

Aus dem medizinischen Zentrum für Zahn-, Mund- und Kieferheilkunde

Abteilung für Zahnerhaltungskunde

(Geschäftsführende Direktorin: Prof. Dr. H. Korbmacher-Steiner)

des Fachbereichs Medizin der Philipps-Universität Marburg

in Zusammenarbeit mit dem

Universitätsklinikum Gießen und Marburg GmbH,

Standort Marburg

Titel der Dissertation:

**Obturation artifizieller Seitenkanäle
nach vier verschiedenen Sealerplacementtechniken
Eine *In-vitro*-Studie**

Inaugural-Dissertation zur Erlangung des Doktorgrades der Zahnmedizin, dem
Fachbereich der Medizin der Philipps-Universität Marburg vorgelegt von

Patrick Brandt

aus

München

Marburg, 2017

Angenommen vom Fachbereich Medizin der Philipps-Universität Marburg

am: 15.12.2017

Gedruckt mit Genehmigung des Fachbereichs.

Dekan: Prof. Dr. Helmut Schäfer

Referent: Priv.-Doz. Dr. Matthias J. Roggendorf

1. Korreferentin: Prof. Dr. Nicole Arweiler

Für meine Mutter, meinen Vater und meine Oma

Inhaltsverzeichnis

1 Zusammenfassung	1
1.1 Hintergrund und Ziele	1
1.2 Methode.....	1
1.3 Ergebnisse.....	2
1.4 Schlussfolgerung	2
2 Summary	3
2.1 Aim.....	3
2.2 Material and Methods	3
2.3 Results.....	4
2.4 Conclusion	4
3 Einleitung	5
4 Literaturübersicht.....	7
4.1 Seitenkanäle	7
4.2 Endodontische Spüllösungen	8
4.2.1 Natriumhypochlorit	9
4.2.2 Zitronensäure	11
4.2.3 Alkohol	12
4.3 Wurzelkanalfüllmaterialien	12
4.4 Wurzelkanalfülltechniken	19
5 Problemstellung	24
6 Material und Methode	25
6.1 Auswahl und Vorbereitung der Probenzähne	25
6.2 Herstellung der Proben	25
6.3 Anlegen der Mulden und Rillen.....	26
6.4 Anpassen des Mastercones.....	28

6.5 Placement-Technik	28
6.6 Röntgenologische Auswertung	30
6.7 Statistische Auswertung.....	32
7 Ergebnisse	33
8 Diskussion	43
8.1 Ziele	43
8.2 Prüfung der Arbeitshypothesen	44
8.3 Diskussion der Methodik.....	45
8.4 Diskussion der Ergebnisse	53
8.5 Klinischer Ausblick	54
9 Literaturverzeichnis	55
10 Anhang	69
10.1 Geräte und Materialien	69
10.2 Abbildungs- und Tabellenverzeichnis	71
11 Verzeichnis akademischer Lehrer	72
12 Danksagung.....	73

1 Zusammenfassung

1.1 Hintergrund und Ziele

Einer Erkrankung der Pulpa und des periapikalen Gewebes liegt immer eine mikrobielle Infektion des Endodonts zu Grunde. Mikroorganismen verbleiben in Dentintubuli, akzessorischen Foramina, Isthmen und lateralen Kanälen. Da die Irregularitäten und laterale Kanäle mit aktuellen Behandlungsprotokollen nur unzureichend gereinigt werden können, besteht das Ziel einer endodontischen Therapie darin, im Anschluss an die chemo-mechanische Reinigung, das gesamte, komplexe Wurzelkanalsystem dreidimensional zu versiegeln um somit eine Reinfektion zu verhindern.

Das Ziel dieser *In-vitro*-Studie war es, vier verschiedene Sealer-Placement-techniken auf Penetrationstiefe, Homogenität und Vollständigkeit des Sealers in simulierte Seitenkanäle und Mulden zu untersuchen.

1.2 Methode

An 60 humanen, extrahierten Zähnen mit geraden Wurzeln und nur einem Wurzelkanal wurden, auf Höhe der Schmelz-Zementgrenze, die Kronen abgetrennt. Die Aufbereitung erfolgte maschinell bis Größe ISO 70 mit dem *FlexMaster*-System (VDW, München, Deutschland) und anschließend bis ISO 80 mit einer *Mity Roto-File* (Loser & Co, Leverkusen, Deutschland). Anschließend wurden die Wurzeln der Länge nach so getrennt, dass zwei identische Hälften entstanden. Eine Hälfte wurde mit einer Rille mit einer Länge von 6 mm und 2 mm Tiefe 2 mm vom Apex entfernt versehen. In die zweite Hälfte wurden 4 Mulden im Abstand von 2 mm, 4 mm, 6 mm und 8 mm vom Apex entfernt, mit 2 mm Tiefe, präpariert. Die so vorbereiteten Wurzeln wurden zusammengesetzt, in *Biresin*-Polyurethanblöcke (Sika N.V, Utrecht, Niederlande) eingebettet.

Die Proben wurden in 4 Gruppen mit jeweils 15 Zähnen entsprechend der Sealer-applikationstechnik aufgeteilt: Gruppe 1: mit einem Guttaperchapoint, Gruppe 2: mit einer Papierspitze, 3: schallaktiviert mit einer ROEKO *CanalBrush* (Coltène/Whaledent AG, Altstätten, Schweiz), Gruppe 4: mit Ultraschall (EMS 600) und einem Spreaderansatz.

Die Wurzelkanalfüllung erfolgte mit den obengenannten Applikationstechniken und einen auf „Tug-Back“ und dem Kanalquerschnitt kongruenten Guttaperchapoint mit Hilfe der Single-cone-Technik. Als Sealer wurde *AH Plus* (Dentsply DeTrey GmbH, Konstanz, Deutschland) verwendet.

Nach 48-stündiger Aushärtung wurden die Proben in oro-vestibulärer Richtung anhand von digitalen Röntgenbildern (*Digora*, Soredex, Helsinki, Finnland), auf Penetrationstiefe, Homogenität und vollständiges Ausfließen des Sealers ausgewertet.

1.3 Ergebnisse

Die schall- bzw. ultraschallaktivierten Gruppen zeigten hinsichtlich Homogenität, Penetrationstiefe und Vollständigkeit signifikant bessere Werte verglichen mit den Gruppen in denen der Sealer mit einem Guttaperchastift oder einer Papierspitze eingebracht wurde. Die Ultraschallgruppe zeigte die besten Ergebnisse. Zwischen der Gruppe 1 und Gruppe 2 gab es statistisch keinen Unterschied.

1.4 Schlussfolgerung

Die Auswertung der Ergebnisse dieser *In-vitro*-Arbeit zeigte, dass eine Aktivierung des Sealers, sowohl mit Schall als auch mit Ultraschall, der herkömmlichen, manuellen Sealerplacement-Technik signifikant überlegen ist, was die Penetrationstiefe, Homogenität und Vollständigkeit in simulierte laterale Kanäle und Irregularitäten betrifft.

2 Summary

2.1 Aim

The reason for a inflammation of the dental pulp and the surrounding periapical tissue is always a bacterial infection. Microorganisms remain within dental tubules, accessory foramina, isthmuses and lateral canals. It is currently not possible to completely disinfect all the irregularities and lateral canals, the aim of the endodontic therapy is, to the chemo-mechanical protocol, to seal the complex root canal system and to prevent a reinfection.

The aim of this *in vitro* study was to compare four sealer placement techniques in sealer penetration depth, homogeneity and complete filling.

2.2 Material and Methods

The crowns of 60 human, single rooted teeth with straight canals were cut of at the enamel-cemental junction. The preparation was performed with *FlexMaster* (VDW, Munich, Germany) up to a size ISO 70. Final preperation was accomplished with the *Mity Roto* file (Loser & Co, Leverkusen, Germany) up to a size of ISO 80. Afterwards the roots were split longitudinally. A groove of 6 mm length and 2 mm deep was cut in one half. In the other half, 4 holes were prepared 2 mm deep and 2 mm, 4 mm, 6 mm and 8 mm from the apex. These prepared roots were put together and embedded into polyurethane blocks (*Biresin*, Sika N.V, Utrecht, Netherlands). The samples were divided into 4 groups with each 15 teeth in accordance with the placement technique: group 1: guttapercha point, group 2: paperpoint, group 3: sonic activation with ROEKO *CanalBrush* (Coltène/Whaledent AG, Altstätten, Switzerland) and group 4: ultrasonic activation with (EMS 600) and an inserted Spreader. The obturation was performed with one of the placement-techniques and a well fitted master cone of gutta-percha using a single-cone technique. The sealer that was used for this study was *AH Plus* (Dentsply DeTrey, Konstanz, Germany). Following the setting

time of the sealer of 48 hours digital radiographs (*Digora*, Soredex, Helsinki, Finland) were made. The images were analysed according to penetration depth, homogeneity and complete filling of the iatrogenic canals.

2.3 Results

The sonic and ultrasonic groups were significantly more effective in terms of penetration depth, homogeneity, and complete filling of the artificial lateral canals. The ultrasonic group performed best.

2.4 Conclusion

The evaluation of this *ex vivo* study showed that both, sonic and ultrasonic activation of sealer leads to a greater penetration depth, increased homogeneity and a more complete filling of simulated lateral canals and hollows.

3 Einleitung

Die Endodontie beschäftigt sich mit der Entstehung, Ätiologie und Therapie des erkrankten Pulpa-Dentin-Komplexes mit dem Ziel einer vollständigen Heilung der betroffenen Gewebe. In den letzten Jahren hat die Endodontie eine beispiellose Entwicklung neuer Technologien, Instrumente und Materialien erfahren wie kaum ein anderer Bereich der Zahnheilkunde. Diese enorme Weiterentwicklung ermöglicht es heute, dem immer weiter steigenden Wunsch nach Zahnerhalt mit einer sehr präzisen Vorhersagbarkeit von durchschnittlich 86% Überlebensrate nach 10 Jahren [16] bei vitalen Fällen und bis zu einer durchschnittlichen Erfolgsquote von 78% bei Revisionen mit apikalen Ostitiden gerecht zu werden [142]. Ein zweizeitiges Vorgehen ist einer Single-visit-Behandlung nicht überlegen [153]. Es können heute klinische Probleme bewältigt werden, die noch vor kurzer Zeit als unmöglich eingestuft wurden und extrahiert werden mussten.

Zu den wohl wichtigsten Erneuerungen zählen die Einführung des Operationsmikroskops, Nickel-Titan Feilen mit neuer *m-Wire*-Legierung und das biokompatible MTA.

Trotz dieser Techniken, ist es noch immer nicht vorhersagbar und vollständig möglich die zahlreichen Irregularitäten, Isthmen, Seitenkanäle und Dentintubuli von Mikroorganismen und Gewebe durch eine chemo-mechanische Präparation zu befreien.

Aus diesem Grund kommt der Obturationstechnik eine besondere Bedeutung zu Gute. Diese soll es ermöglichen alle gereinigten Irregularitäten und Seitenkanäle homogen und langzeitstabil dreidimensional auszufüllen, um den verbliebenen Mikroorganismen ein erneutes Wachstum, ein so genanntes „regrowth“, zu verhindern. Aus dieser Problematik heraus ergeben sich die Fragen, ob Aktivierungstechniken zu einer unterschiedlichen Penetrationstiefe des Sealers in simulierte Seitenkanäle führen, signifikante Auswirkungen hinsichtlich der Homogenität der mit Sealer gefüllten lateralen Kanäle aufweisen oder ob auch die Lokalisation der Ausbuchtungen signifikante Einflüsse auf die Penetrationstiefe von Sealer aufweist. Um den Sealer gleichmäßig auf der Kanalwand zu verteilen sind unzählige Methoden bekannt.

Ziel dieser In-vitro-Studie war es, vier verschiedene Sealerplacement-Techniken vorzustellen und entsprechend der Fragestellung in Bezug auf Homogenität und Eindringtiefe des Sealers in simulierte Seitenkanäle und Rillen zu untersuchen und im Rahmen einer Diskussion kritisch zu erörtern.

4 Literaturübersicht

4.1 Seitenkanäle

Seitenkanäle und Ramifikationen bilden sich bereits während der embryonalen Zahnentwicklung. Die Hertwig'sche Epithelscheide wächst in das mesenchymale Gewebe vor, wobei lokal kleine Lücken entstehen können, oder dort verlaufende Blutgefäße eingekapselt werden [104]. In diesen Bereichen findet keine Dentinbildung statt, so dass eine dauerhafte Kanalstruktur mit Verbindung zum Parodontium gebildet wird [104]. Diese lateralen Kanäle enthalten neben Bindegewebe auch Blutgefäße und Nervenfasern und stellen somit einen kollateralen Kreislauf mit dem extraradikulären Gewebe dar [25]. Die Winkel in denen die Seitenkanäle abzweigen reichen von horizontal über vertikal bis lateral [26]. Sie kommen in jedem Zahn der permanenten Dentition vor. Die Inzidenz wird im apikalen Drittel mit 73%, im mittleren Drittel mit 11% und im koronalen Drittel mit 6,5% angegeben [146, 147].

Besondere Bedeutung besitzen Seitenkanäle im Falle einer infizierten Nekrose der Pulpa, da erst in diesem Stadium die darin enthaltenen Gewebsstrukturen zerfallen und mit Mikroorganismen besiedelt [104]. Diese können mechanisch nicht erreicht und auch chemisch nur unvollständig desinfiziert werden [21, 27]. Die Literatur beschreibt hierzu einige Fallberichte, in denen persistierende Infektionen in Seitenkanälen für ein Scheitern der endodontischen Therapie verantwortlich gemacht wurden [86, 103]. Die Tatsache, dass Seitenkanäle mechanisch nicht gereinigt werden können aber in jeder Zahngruppe vorzufinden sind, macht es daher umso wichtiger ein hohes Augenmerk auf die chemische Desinfektion und eine effektive Sealerplacement-Technik zu legen um das komplexe Kanalsystem vollständig und vor allem dauerhaft zu verschließen

4.2 Endodontische Spüllösungen

Mit Hilfe der mechanischen Aufbereitung ist es lediglich möglich 60-80% des Hauptkanals zu instrumentieren [59]. Isthmen, Seitenkanäle und Dentintubuli bleiben vollkommen uninstrumentiert [49].

Mikroorganismen können tief in Dentintubuli, bis an die Dentin-Zementgrenze vordringen [121, 128]. Somit stellen sie eine persistierende Infektionsquelle dar, die für einen endodontischen Misserfolg verantwortlich sein kann. Während der mechanischen Instrumentation kommt es zum Abtrag von Dentin und von vitalem und nekrotischem Gewebe, was zu einer Debris- und Smearlayer-Bildung führt [59].

Dies verdeutlicht die Wichtigkeit eines effektiven Spülprotokolls um auch die Bereiche, die von der mechanischen Bearbeitung nicht erreicht werden oder durch diese verblockt werden, zu desinfizieren. Auf Grund dieser Überlegungen muss eine ideale Spüllösung folgende Eigenschaft erfüllen:

- Ausschwemmen von Dentinspänen
- Gleitmittelwirkung für Feilen
- Auflösen sowohl organischer als auch anorganischer Bestandteile
- desinfizierend gegenüber Bakterien, Viren und Pilzen
- nicht zahnschwächend und biokompatibel.

Da gegenwärtig keine Spüllösung in der Lage ist all diese Anforderungen alleine zu erfüllen, ist es unumgänglich mehrere Spüllösungen miteinander zu kombinieren. Nur mit Hilfe eines effektiven Spülprotokolls ist es möglich, durch die synergistische Wirkung verschiedener Lösungen das biologische Problem in den Griff zu bekommen. Durch die zusätzliche Aktivierung der Spüllösung kann die reinigende und desinfizierende Leistung enorm gesteigert werden [13, 157]. Jedoch ist es dennoch nicht möglich, das Endodont vollständig zu desinfizieren.

Deshalb ist das Ziel, mit Hilfe der chemischen Desinfektion die Anzahl für die Infektion verantwortlichen Keime unter die individuelle Erregerschwelle zu drücken, um eine Ausheilung der periapikalen Strukturen zu ermöglichen [129]. In der Literatur sind zahlreiche Spüllösungen beschrieben. Nachfolgend sollen

die Spüllösungen, die in dieser Arbeit verwendet wurden, näher beschrieben werden.

4.2.1 Natriumhypochlorit

Da Natriumhypochlorit, neben seiner effektiven desinfizierenden Fähigkeit, in der Lage ist vitales und nekrotisches Gewebe aufzulösen [89], hat sich dieses Spülmittel als das Wichtigste in der Endodontie etabliert.

Natriumhypochlorit ist das Natriumsalz der hypochlorigen Säure und besitzt einen pH-Wert von 11-12. Es wird in der Regel in Konzentrationen von 0,5-6% in der Endodontie eingesetzt. Konzentrationen unter 0,5% sollten dahingegen keine Verwendung finden, da dann der gewebsauflösende Effekt nicht mehr gewährleistet werden kann [8]. Die Prozentangaben beziehen sich auf die enthaltene Menge des wirksamen Chlors.

NaOCl dissoziiert in wässrigen Lösungen zu Na^+ , OCl^- und HOCl. Bei pH 12, sprich in ungepufferter Lösung, liegt das freie Chlor überwiegend als OCl^- vor. Beide Moleküle, OCl^- und HOCl, sind sehr reaktive Oxidationsmittel [3]. Die antimikrobielle wie auch die gewebeauflösende Wirkung von Hypochloritlösungen beruht auf der Präsenz von freiem Chlor im System.

Indem die Hypochlorsäure (HOCl) mit der Zellwand von Mikroorganismen reagiert, kommt es zur Chlorierung funktioneller Gruppen und zur Zerstörung der Zellwand durch Peroxidation von Membranlipiden [157]. Deshalb besitzt NaOCl einen breitgefächerten antimikrobiellen Effekt gegenüber vielen, für eine Wurzelkanalinfektion verantwortlichen Bakterien und Pilze [112, 147]. Somit ist NaOCl in der Lage, die für die Immunantwort verantwortlichen Zerfallsprodukte, so genannte Endotoxine und auch Zellwandbestandteile gramnegativer Bakterien (Lipopolisaccheride), zu eliminieren [30, 78, 125]. Stojicic et al. zeigten in ihrem Versuchsaufbau, dass der gewebeauflösende Effekt einer NaOCl-Lösung erheblich von der Temperatur, Konzentration und Einwirkzeit abhängt. Sie fanden heraus, dass eine 5,8%ige NaOCl Lösung bei 45°C signifikant mehr Gewebe auflöst als eine 2%ige oder 4%ige Lösung bei niedrigerer Temperatur [138]. Eine andere Studie belegte, dass eine Temperaturerhöhung um 25°C die

Effektivität um 100% steigert [131] und somit den gewebssauflösenden Effekt und die Fähigkeit die organischen Anteile des Debris und des Smearlayers von der Kanalwand zu entfernen, verglichen mit nicht erwärmtem NaOCl [1, 62].

NaOCl zeigt einen proteolytischen Effekt auf die organischen Anteile des Dentins (Kollagengeflecht). Daher werden die mechanischen Eigenschaften des Dentins durch eine Spülung mit einer 5,25%igen NaOCl-Lösung deutlich reduziert [126].

Die Anwesenheit organischer Bestandteile wie, Dentin, entzündliches Exudat, Restgewebe und bakterielle Abbauprodukte, verringern die antimikrobiellen und proteolytischen Eigenschaften von NaOCl, daher sollte ständig frisches NaOCl dem Kanalsystem zugeführt werden [49, 100].

In-vitro-Studien belegen, dass eine Spülung mit 5,25%igem NaOCl keinen steigernden Effekt hat Mikroorganismen zu reduzieren verglichen mit einer 1%igen Lösung.

Berber et al zeigten, dass eine Spülung mit höherer Konzentration von NaOCl Lösungen keine gesteigerte Desinfektionsleistung in mit *E. faecalis* infizierten Kanälen aufweisen. Die Ergebnisse bestätigten jedoch, dass das Spülen mit 5,25% tiefer in Dentintubuli eindringt [9]. Die Autoren schlussfolgerten, dass für die effektive Keimreduktion vielmehr Einwirkzeit und der Umsatz an Spüllösung wichtiger ist als die Konzentration [17, 59, 127].

4.2.2 Zitronensäure

Um das vollständige Kanalsystem reinigen zu können benötigt man Spülungen, die in der Lage sind organische und anorganische Bestandteile aufzulösen. Da NaOCl nicht in der Lage ist anorganisches Material zu entfernen [49] kommt es, trotz aller erwähnten positiven Eigenschaften, nicht als alleinige Spülung in Frage.

Um Mikroorganismen auch in Seitenkanälen und Dentintubuli zu erreichen und somit eine effektivere Desinfektion zu gewährleisten, ist es essentiell die Kanalwand von Smearlayer und Debris zu reinigen [32, 143]. Hierfür werden Chelatbildner wie Zitronensäure oder EDTA genutzt. Zitronensäure wird in den Konzentrationen zwischen 1% und 50% mit einem pH-Wert von 1 und 2 eingesetzt. Eine bessere Entfernung des Smearlayers wird durch Lösungen mit niedrigerem pH-Wert (1 und 2) gegenüber gepufferten Zitronensäurelösungen mit einem pH-Wert von 6 erreicht. Somit stellt der pH-Wert eine bedeutendere Komponente als die Konzentration dar [52]. Zitronensäure wird eine bessere Biokompatibilität gegenüber EDTA zugeschrieben. In einer *In-vivo*-Tierstudie zeigte eine 10%ige Zitronensäurelösung nach 14 Tagen die geringste Anzahl an Entzündungszellen [114].

Ein Nachteil bei der Verwendung von Zitronensäure gegenüber EDTA ist, dass bei höheren Konzentrationen auch das peritubuläre Dentin aufgelöst wird [31]. Zudem besitzt Zitronensäure keine fungiziden Eigenschaften.

Da Zitronensäure die antimikrobiellen und gewebeauflösenden Eigenschaften von NaOCl bei Mischung der Lösungen unmittelbar unwirksam macht, indem es das frei verfügbare Chlor bindet, sollte keine Wechselfspülung erfolgen [156].

4.2.3 Alkohol

Im Anschluss an das chemo-mechanische Desinfektionsprotokoll wird das Kanalsystem für die Obturation vorbereitet. Hierfür ist es essentiell eine absolute Trockenheit zu erreichen.

Um das zu erreichen werden als Abschlussspülung Alkohole (Isopropylalkohol; Ethylalkohol) in einer Konzentration von 70-96% eingesetzt. Auf Grund ihrer geringen Oberflächenspannung dringen sie tief in Dentintubuli ein und begünstigen auch dort, durch eine schnelle Verdunstung eine effektive Trocknung.

Zudem verbessert eine abschließende Spülung mit Alkohol das Fließverhalten von Sealern an die Kanalwand und sogar das Eindringen in Dentintubuli, was für eine homogenere und dichtere Wurzelfüllung sorgt [137]. Da Alkohol lediglich eine schwach antimikrobielle Wirkung besitzt, sollte diese Spüllösung lediglich als Abschlussspülung unmittelbar vor der Wurzelkanalfüllung eingesetzt werden.

4.3 Wurzelkanalfüllmaterialien

Im Anschluss an die chemo-mechanische Aufbereitung, soll das Kanalsystem mittels geeigneter Wurzelkanalfüllmaterialien dreidimensional dauerhaft verschlossen werden. Da es gegenwärtig unmöglich ist, das komplexe Wurzelkanalgeflecht vollständig von Mikroorganismen und ihren Abbauprodukten zu reinigen, liegt die Hauptaufgabe der Obturation darin, keine Nischen und Wachstumspfade für Keime zurückzulassen [7]. Vielmehr ist es essentiell, durch einen möglichst dichten Verschluss, die verbliebenen Bakterien einzuschließen um so ein mögliches „regrowth“ zu verhindern [98]. Um einen langfristigen Erfolg zu garantieren, ist es wichtig auch Irregularitäten, Seitenkanäle, Isthmen und Dentintubuli mit Wurzelkanalfüllmaterial zu verschließen [53]. Um diese Aufgaben zu erfüllen, müssen diese Materialien unlöslich, nicht resorbierbar, dimensionsstabil und homogen, biokompatibel und bakteriostatisch oder sogar bakterizid sein. Zusätzlich sollte die

Wurzelkanalfüllung einen Verbund zum Dentin eingehen, keine Verfärbungen verursachen und röntgendicht sein [35].

Für die Obturation werden Pastenpräparate, so genannte Sealer und Wurzelkanalfüllstifte verwendet. Der Sealer hat dabei die Aufgabe die Unregelmäßigkeiten im Kanalverlauf auszugleichen und kleinste Bereiche auszufüllen. Die Wurzelkanalfüllstifte werden benötigt um, beim Einbringen, einen Stempeldruck auf den Sealer auszuüben um diesen dreidimensional an alle Bereiche der Kanalwand zu verteilen. Zusätzlich soll mit Hilfe des Kernmaterials die Menge des Sealers so gering wie möglich gehalten werden um der Schrumpfung und der Porosität, die ein Sealer bei der Aushärtung mit sich bringt, entgegenzuwirken [113].

Wurzelkanalfüllstifte können in feste und halbfeste Stifte unterteilt. Feste Stifte werden aus Silber, Titan oder Kunststoff gefertigt. Der Nachteil dieser Materialien ist, dass sie nicht verformbar sind, so dass keine Anpassung an die Kanalanatomie möglich ist. Ein hoher Sealeranteil mit allen damit verbundenen Nachteilen und ein stark ausgeprägtes Leakage ist die Folge. Ein weiterer Nachteil ist, dass eine Revision nur unter hohem Substanzverlust realisierbar, in den meisten Fällen sogar unmöglich ist. Silberstifte sollten heute als Wurzelfüllmaterial, keinerlei Verwendung mehr finden [30], da diese in Kontakt mit Gewebeflüssigkeit beginnen zu korrodieren [160] und auf diese Weise Silbersulfat, Silberchlorid, Silbersulfit sowie Silbercarbonat freisetzen [51]. Kunststoffstifte finden gegenwärtig nur noch als Trägermaterial das mit Guttapercha ummantelt wird Anwendung. In die Kategorie der halbfesten Stifte ist Guttapercha einzuordnen. Die Zusammensetzung der handelsüblichen Stifte variiert sehr stark. Sie bestehen zu ungefähr 20% aus Guttapercha und bis zu 70% aus Zinkoxid [93]. Wachse als Weichmacher sind durchschnittlich zu 4% enthalten. Metallsulfate für die Röntgenopazität finden sich mit bis zu 15% [47]. Bei Raumtemperatur ist das Material in festem Zustand. Ab einer Temperatur von 60°C ist es verformbar. Auf der einen Seite kann die Biokompatibilität des Guttapercha-Anteils als sehr gut eingestuft werden, auf der anderen Seite führt der Zinkoxid-Anteil bei Gewebekontakt zu einer Ionenabgabe, der eine ausgeprägte Toxizität nachgewiesen werden konnte [96]. Der große Vorteil gegenüber den festen Stiften ist die gute Revidierbarkeit von Guttapercha, da

diese mit organischen Lösungsmitteln wie Chloroform, Eukalyptol oder Orangenöl angelöst und verflüssigt werden können.

Dem Zahnarzt stehen unzählige Sealer aus unterschiedlichsten chemischen Klassen zur Verfügung. Nachfolgend werden diese, die aktuell von klinischem Interesse sind, näher dargestellt.

Der Sealer der in dieser Studie verwendet wurde ist *AH Plus*. Ein Sealer auf Epoxidharz-Basis. Dieser wird gegenwärtig als „Goldstandard“ angesehen und in vielen Universitäten und spezialisierten Praxen eingesetzt [30]. *AH Plus* ist die Weiterentwicklung des im Jahre 1954 eingeführten und bis dahin, in Europa führenden Sealers *AH 26*. Dieser, aus Paste und Flüssigkeit zu mischende Sealer, setzte direkt nach dem Mischen Formaldehyd frei [30], wodurch eine zytotoxische und neurotoxische Wirkung eintritt. Aus diesem Grund wird die Verwendung heute aufgrund der Verfügbarkeit moderner Sealer nicht mehr empfohlen. Um das Entstehen von Formaldehyd zu verhindern wurde in *AH Plus* das Hexamethylentetramin ersetzt [30]. Leonardo et al. konnten jedoch zeigen, dass auch die veränderte Zusammensetzung zu einer leichten Formaldehydfreisetzung führt [70]. *AH Plus* wird als Zwei-Komponenten-Sealer als Paste-Paste-System in 2 Tuben zur manuellen Verarbeitung oder in einer Automixspritze als *AH Plus Jet* angeboten. Die Abbindereaktion ist eine Polyadditionsreaktion, bei der sich Diepoxid mit Mono- und Diaminen zu Epoxidaminen verbindet [120], wodurch eine hohe Volumenstabilität und zudem eine hohe Dentinhaftung gewährleistet werden kann [39]. Initial kann sogar eine Expansion während des Abbindens nachgewiesen werden [81]. Es konnte gezeigt werden, dass *AH Plus* keine nachweisbaren genotoxischen oder mutagene Eigenschaften im Gegensatz zu seinem Vorgänger dem *AH 26* auf Zellen des parodontalen Ligaments besitzt [72]. Eine neuere *In-vivo*-Studie an Schweinen zeigte, dass *AH Plus* intraossär, schwere Entzündungen auslöst, wohingegen *Epiphany* ein methacrylatbasierter Sealer keine bis sehr geringen Entzündungen verursachte [136].



Abb. 1: *AH Plus*-Sealer in der Paste-Paste-Applikationsform

Auch die Stoffklasse der Glasionomerzemente wurde für den Einsatz als Sealer modifiziert. Mit der Entwicklung von *Ketac Endo* (ESPE, Seefeld, Deutschland) versuchte man die physikalischen Eigenschaften, wie Dentin- und Schmelzhaftung und die geringe Löslichkeit in den Wurzelkanal zu übertragen. Die Studie von Ogasawara et al. bestätigte die gute Gewebeerträglichkeit und zeigten, dass der Glasionomer-Sealer eine deutlich geringere Löslichkeit aufweist als ein Sealer auf Zinkoxid-Eugenol-Basis [90]. Eine weitere Untersuchung kam zu dem Ergebnis, dass *Ketac Endo* eine sehr gute Dentinhaftung aufweist, wenn zuvor der Smear layer entfernt wurde [141]. Das ein Glasionomer-Sealer eine höhere Dichtigkeit, trotz seiner guten physikalischen und chemischen Eigenschaften aufweist, widerlegten Fransen et al. in ihrer Studie, in der sie *AH Plus*, *Resilon* und *Active GP* auf „Leakage“ untersuchten. Sie kamen zu dem Ergebnis, dass es zwischen den drei Stoffklassen keinen statistischen Unterschied gab [37].

Auch Sealer auf Zinkoxid-Eugenol-Basis finden auf Grund ihrer langen Geschichte und umfangreichen Erfahrung noch immer Verwendung [159]. Der meistverwendete Sealer ist der *Pulp Canal Sealer* (Sybron Endo). Die Konsistenz

des Sealers wird über das Verhältnis von Pulver zu Flüssigkeit bestimmt, weshalb er häufig für die warm-vertikale Kompaktion verwendet wird. Nachteile dieser Sealer sind, dass sie eine hohe Löslichkeit [93] und eine hohe Schrumpfung aufweisen [63]. Ein aktueller Übersichtsartikel zeigte, dass Zinkoxid-Eugenol-Sealer sehr stark die adhäsive Befestigung von Glasfaserstiften negativ beeinflussen [4].

Eine weitere Materialgruppe basiert auf Polydimethylsiloxan. Der aktuelle Hauptvertreter dieser, auf Silikon basierenden Sealergruppe, ist *GuttaFlow 2* (Coltène/Whaledent, Altstätten, Schweiz) und ist eine Abwandlung von *RSA RoekoSeal Automix* (Coltène/Whaledent, Langenau, Germany) und die direkte Weiterentwicklung von *GuttaFlow* (Coltène/Whaledent, Altstätten, Schweiz). Die Besonderheiten dieses Produktes sind die enthaltenden Guttaperchapartikel in Pulverform mit einer Korngröße von 30 µm und die Expansion beim Abbindevorgang [66]. Studien zeigen, dass *GuttaFlow* eine herausragende Biokompatibilität besitzt und sehr geringe zytotoxische Eigenschaften aufweist [14]. In Hinsicht auf eine antibakterielle Eigenschaft gegenüber *E. faecalis* ist *GuttaFlow* dem in dieser Studie verwendeten Sealer *AH Plus* jedoch unterlegen [34]. Auch weitere Studien verglichen die antibakteriellen Eigenschaften verschiedener Sealer und kamen ebenfalls zu dem Ergebnis, dass *GuttaFlow* diesbezüglich Nachteile aufweist [14, 82]. Roggendorf et al. untersuchten apikale Undichtigkeiten verschiedener Sealer und zeigten, dass *GuttaFlow* verglichen mit *AH Plus* gleichwertige Ergebnisse erzielt [108, 109]. Zum anderen konnte diese Arbeitsgruppe zeigen, dass *GuttaFlow* am unempfindlichsten gegenüber den verwendeten Spüllösungen bei dem Abbindevorgang ist [106].

Ein anderer werkstoffkundlicher Ansatz ist es die Adhäsivtechnik, aus der restaurativen Zahnheilkunde, mittels Sealer, basierend auf Methacrylat, in den Wurzelkanal zu übertragen. *Hydron* (Hydron Technologies, Inc, Pompano Beach, FL) kam als erster Vertreter bereits in den 1970er Jahren auf den Markt. Der Hauptbestandteil dieses auf Kunststoff basierenden Sealers war das Polyhydroxyethylmethacrylat. Dieser Bestandteil sollte laut Herstellerangaben für hydrophile Eigenschaften sorgen [74]. *Hydron* wurde in den Wurzelkanal initiiert und als Ganzes ausgehärtet. Nachdem jedoch Studien belegten, dass dieser Sealer schwere Entzündungen verursacht, bakterielles Leakage aufweist und auf Grund von Wasseraufnahme quillt, wurde *Hydron* als obsolet eingestuft [68, 84,

102, 155]. Mit *EndoREZ* (Ultradent Products Inc., South Jordan, UT) gelang es die Adhäsivtechnik erstmals erfolgreich zu etablieren. Dieser Sealer ist dualhärtend und nicht selbstätzend [28, 140]. *EndoREZ* zeigt eine starke Adhäsion an der Kanalwand und eine gute Penetration in Dentintubuli, auch unter feuchten Bedingungen. Verglichen mit *GuttaFlow*, einem bereits diskutierten Sealer auf Silikonbasis, ist die Abdichtung, auf Grund einer höheren Polymerisationsschrumpfung jedoch deutlich schlechter [15]. Mit der Einführung von *Resilon* und *RealSeal* wurde mittels eines selbstätzenden Primers, der als aktives Monomer das so genannte 2-acrylamido-2-methyl-propanesulfonic acid (AMPS) enthält, der klinische Vorgang weiter vereinfacht [64].

Um eine Mikroverzahnung des Komposit-Sealers mit den Dentintubuli zu gewährleisten und somit einen Verbund zur Kanalwand zu gewährleisten ist die Entfernung des Smear layers erforderlich [65]. Die neueste Entwicklung integriert alle chemischen Komponenten in einer Masse. Somit ist nun die Säure aus dem Primer (4-methacryloyloxyethyl trimellitate anhydride), in die Methacrylat-Masse des Sealers integriert worden [64]. Durch das Wegfallen des Arbeitsschrittes, das Wurzelentin separat für die adhäsive Wurzelkanalfüllung konditionieren zu müssen, wird eine weitere Fehlerquelle eliminiert und die Behandlungszeit somit verkürzt [101]. Der Hauptvertreter dieser 4. Generation ist die Weiterentwicklung des *RealSeal* (Sybron Endo), welches durch die Ergänzung der Buchstaben *SE* für „self-etch“, also selbst-ätzend steht, kenntlich gemacht wird [75]. Trotz dieser Entwicklungen ist das Erreichen der kommerziell propagierten Vorstellung eines so genannten „Monoblocks“, einer chemischen Verbindung sowohl zwischen Wurzelkanalentin und Sealer auf der einen Seite, sowie zwischen Sealer und Wurzelkanalfüllstift auf der anderen Seite jedoch nur unvollständig realisierbar. Da es nicht möglich ist alle Kanalabschnitte zu instrumentieren, verbleiben Abschnitte mit sklerosiertem Dentin, die eine Adhäsivtechnik unmöglich machen [36]. Ein weiteres Problem stellt der hohe C-Faktor innerhalb des Wurzelkanals dar [119]. Paque et al. belegten, dass ein Sealer auf Methacrylatbasis verglichen mit *AH Plus* nach 16 Monaten statistisch schlechtere Dichtigkeitswerte aufweist [95]. Eine Zusammenfassung der Literatur belegt, dass Sealer auf Methacrylatbasis keine Optimierung der Dichtigkeit verglichen mit konventionellen Sealern ermöglichen. Auch bedeutet die Verwendung eines Methacrylatsealers keine Stabilisierung der Wurzel [64]. Abschließend ist zu

erwähnen, dass ein adhäsiver Verbund von Natriumhypochlorit stark negativ beeinflusst wird. Daher sollten bei der Verwendung von kompositbasierten Sealern EDTA oder CHX als abschließende Spüllösungen eingesetzt werden [87].

Die neueste Sealergeneration sind biokeramische Sealer (BCS). Diese bestehen aus Zirkonoxid (für die Röntgenopazität), Calciumsilikat, Calciumphosphat, Calciumhydroxid und Füllern [54]. Die Hauptvertreter sind, der *EndoSequence BC Sealer* (Brassler USA, Savannah, Georgia) und *iRoot SP* (innovative Bioceramix IBC, Vancouver, Canada). In Deutschland wird dieser Sealer unter dem Namen *Total Fill* (American Dental Systems, Vaterstetten, Deutschland) vertrieben. Die Zusammensetzung der jeweiligen Produkte ist identisch. Für die Abbindereaktion wird Wasser benötigt [85]. Zum einen bezieht der Sealer das Wasser aus den umliegenden Dentintubuli und zusätzlich wird Wasser aus der Reaktion zwischen Calciumphosphat und Calciumhydroxid absorbiert. Innerhalb dieser Reaktion entsteht auch eine Calciumsilikat- und hydratphase [150]. Das während des Abbindens freiwerdende Hydroxylapatit ermöglicht eine Adhäsion zum Dentin [154]. Studien belegen, dass Mineral-Trioxid-Aggregat (MTA) sehr biokompatibel ist und keinerlei Schrumpfung während des Abbindevorgangs aufweist und dadurch eine hohe Dichtigkeit besitzt [144]. Deshalb war es das Ziel, diese Eigenschaften von MTA-Zementen auf einen Sealer zu übertragen. Candeiro et al. verglichen *Endosequence BC Sealer* mit *AH Plus* und konnten zeigen, dass der biokeramische Sealer einen deutlich höheren pH-Wert aufweist und sowie signifikant mehr Ca^{2+} -Ionen freisetzt. Sie konstatierten, dass der Sealer auf Silikatbasis biokompatibel, nicht toxisch, chemisch stabil ist sowie keinerlei Schrumpfung aufweist [20]. Eine weitere Studie bestätigte die gute Biokompatibilität [83]. Abschließend ist noch hervorzuheben, dass diese Sealer während ihres Aushärtvorgangs Hydroxylapatit freisetzen [158] und zudem stimulierend auf Parodontalzellen sind und osteokonduktiv sind [67].



Abb. 2: Das *Total Fill* Wurzelkanalset besteht aus Papierspitzen, beschichteten Guttaperchastiften und dem biokeramischen Sealer. (Foto: Brasseler Holdings)

4.4 Wurzelkanalfülltechniken

Ziel der Wurzelkanalfüllung ist es, das gesäuberte und präparierte Kanalsystem vollständig dreidimensional zu versiegeln. Hierfür ist in der Literatur eine Vielzahl an Techniken aufgeführt. Diese beschreiben unterschiedliche Anforderungen an technischer Ausstattung und behandlerischen Fähigkeiten. Sie werden generell in zwei Hauptgruppen, den Kalt- und Warmfülltechniken unterteilt. Zu den Kaltfülltechniken werden die Zentralstifttechnik, laterale Kompaktion (LK) und die Non-Compaction-Technik gezählt. Zu der Gruppe der Warmfülltechniken gehören die warme vertikale Kompaktion (Schilder-Technik und Continuous wave of condensation), die thermische Einstift-Methode (*ThermaFil*) und die Injektionstechnik. Im Folgenden werden die Techniken mit der größten klinischen Relevanz näher besprochen.

Die als Zentralstift oder auch als Einstifttechnik und Single-cone-Technik beschriebene Methode stellt die technisch am einfachsten zu erlernende und zugleich die schnellste Fülltechnik dar. Hierbei wird ein einzelner bereits genormter Guttaperchastift entsprechend dem Taper und apikaler ISO-Größe der zuletzt verwendeten Feile (Master-Apical-File = MAF) so angepasst, dass dieser auf Arbeitslänge eine gewisse Klemmpassung, einen so genannten „tug back“, aufweist. Nachdem die Wurzelkanalwände gleichmäßig mit einer dünnen Schicht Sealer benetzt worden sind, wird der in Sealer getauchte und angepasste „Mastercone“ mit einer langsamen und konstanten Bewegung eingeführt. Diese

kontrollierte und behutsame Bewegung ermöglicht es dem überschüssigen Material nach koronal abzufließen. Der Erfolg dieser Methode ist von der exakten apikalen Passung des formstabilen Mastercones und der Kongruenz zum Wurzelkanallumen abhängig, da die meisten Sealer eine Abbindedekonstruktion, Porositäten aufweisen und resorbierbar sind [117]. Marciano et al. wiesen nach, dass in gekrümmten Wurzelkanälen die *Thermafil*-Technik signifikant mehr Guttaperchaanteile auf 2 und 4 mm aufwies verglichen mit der Einstifttechnik [76]. Die Arbeitsgruppe um Schäfer zeigte wiederum, dass die „Single-cone-Technik“ in engen und runden Wurzelkanälen eine homogene und dichte Füllung mit einem hohem Guttaperchaanteil erreichen kann [115]. Ein weiterer Nachteil dieser Fülltechnik besteht in dem Fehlen des nach lateral und apikal gerichteten Stempeldrucks, der die notwendige Voraussetzung dafür ist, Isthmen, laterale Kanäle und apikale Deltas zu füllen [53]. Auf Basis dieser Ergebnisse stellen sich daher folgende Fragen: 1. Haben Aktivierungstechniken einen Einfluss auf die Eindringtiefe des Sealers in laterale Ausbuchtung. 2. Zeigen die Aktivierungstechniken unterschiedliche Homogenitäten hinsichtlich des Füllungsgrades der Ausbuchtungen. 3. Zeigt die Lokalisation der Mulden einen Einfluss auf die Eindringtiefe des Sealers. Somit ist festzuhalten, dass die Einstifttechnik heute ausschließlich in geraden und runden Kanälen eingesetzt werden sollte um eine wandständige Wurzelkanalfüllung mit möglichst wenigen Sealeranteilen zu erhalten [43].

Die laterale Kompaktion (LK) ist die weltweit am meisten angewandte Methode Wurzelkanäle zu füllen und gilt in der Literatur als Goldstandard [18, 58]. Das Prinzip besteht darin einen Hauptstift (Mastercone) mit vielen akzessorischen Nebenstiften unter der Verwendung von Spreadern zu verdichten. Als Präparationsform wird eine konstanter Konizität (so genannter „taper“ über die komplette Länge des Wurzelkanals benötigt. Die engste Stelle bildet dabei der apikale Endpunkt, die weiteste Stelle das Orifizium [3]. Der Mastercone wird entsprechend der zuletzt verwendeten Feile angepasst, bis dieser eine Friktion auf den letzten 3 mm aufweist. Hierzu wird ein ISO-genormter Stift empfohlen, da dieser eine größere Eindringtiefe des Spreaders ermöglicht [152]. Nachdem die Kanalwände mit Hilfe einer geeigneten Placementtechnik mit Sealer gleichmäßig benetzt worden sind, wird der Mastercone auf volle Arbeitslänge eingebracht. Dieser wird nun, mit Hilfe eines Hand- oder Fingerspreaders nach

lateral verdichtet. Dabei sollte der Spreader so ausgesucht werden, dass dieser bis 1 mm vor Arbeitslänge eindringen kann um eine möglichst exakte Kompaktion der Apikalregion in lateraler und apikaler Richtung zu erreichen. Um den Hauptstift bei der Entfernung des Spreaders aus dem Wurzelkanal nicht zu entfernen, sollte dieser mit kleinen Hin- und Her-Bewegungen vorsichtig gelöst werden. Der so geschaffene Hohlraum wird nun mit einem möglichst zum Spreader kongruenten Nebenstift aufgefüllt. Dieser Vorgang wird so oft wiederholt, bis nur noch ein Eindringen des Spreaders bis 2-3 mm unterhalb des Kanaleingangs möglich ist. Im Anschluss werden die überschüssigen Guttaperchastifte mit einer Hitzequelle auf Höhe des Orifiziums abgeschmolzen und verdichtet. Die LK stellt eine zeitintensive [24] und technisch aufwändigere Methode dar [105]. Ein deutlicher Nachteil der lateralen Kompaktion liegt in dem erhöhten Auftreten von Vertikalfrakturen. Holcomb et al. zeigten, dass es während der Kompaktion zu lateralen Kräften von bis zu 3 kg kommen kann, die zu 13% eine Längsfraktur zu Folge hatten [56]. Die Verwendung von Nickel-Titan-Fingerspreadern ermöglicht auf Grund höherer Taktilität [71] und weniger Druck auf die Kanalwände [33], so dass das Risiko einer Vertikalfaktur deutlich reduziert werden kann. Ein weiterer Nachteil besteht darin, dass durch die LK keine homogene Masse entsteht, da sich die Guttaperchastifte nicht miteinander verbinden. Als Vorteil kann aufgeführt werden, dass diese Technik eine gute Kontrolle über apikales Überpressen bietet. So zeigte die *In-vivo*-Studie von Demirci et al., dass die Zähne, die mit der LK gefüllt wurden, nach 48 h signifikant weniger postoperative Beschwerden hatten als die, die mit *Thermafil* gefüllt wurden. Die Autoren begründeten Ihre Ergebnisse, dass durch die LK kaum Überpressungen zu erkennen waren [29]. Zudem zeigen Studien, dass eine adäquat angewendete LK sehr zeitintensiv ist [24].

Eine Variante der LK ist die „Non-compaction Technik“. Hierbei wird ebenfalls mit Hilfe eines Mastercones und akzessorischen Stiften ein Verschluss der Wurzelkanäle generiert. Der Unterschied besteht darin, dass die Nebenstifte ohne Hilfe von Druck und Spreadern lediglich passiv dazu gesteckt werden. Auf diese Weise wird das Risiko der Vertikalfaktur verringert, jedoch wird kein Kompaktieren der Guttapercha ermöglicht, was den Sealeranteil wieder erhöht.

Schilder beschrieb 1967 erstmals die Kompaktion (WVK) als eine Methode, das komplexe Wurzelkanalsystem mit allen Irregularitäten, lateralen Kanälen und

Ramifikationen dreidimensional füllen zu können [118]. Um diese Technik vorhersagbar und sicher anwenden zu können, musste die Präparation des Wurzelkanals einen kontinuierlichen ausgeprägten Konus mit einer apikalen „Kontrollzone“ aufweisen, den ursprünglichen Kanalverlauf beibehalten und das Foramen durfte nicht erweitert werden [111]. Der Mastercone wird so zurecht getrimmt, bis dieser auf 0,5-1 mm kürzer als die Arbeitslänge eine Klemmpassung aufweist. Mit Hilfe eines erhitzten Pluggers wird der mit Sealer benetzte Mastercone eingebracht, dann zunächst am Kanaleingang abgeschmolzen und anschließend mit einem kalten Plugger vertikal verdichtet. Dieser Schritt wird so oft wiederholt, bis man 2-3 mm koronal der Arbeitslänge angelangt ist. Auf diese Weise hat man auch die apikale Portion der Guttapercha verformt [151]. Die Plugger-Größen sind so einzupassen, dass diese keinen Kontakt zur Kanalwand aufweisen, um keine Sprengwirkung zu entwickeln [44]. Im Anschluss an die „Downpack-Phase“ wird der koronale, noch ungefüllte Kanalanteil mit geschmolzener Guttapercha im Injektionsverfahren entweder in Inkrementen oder auf einmal gefüllt. Eine Variante der klassischen Schilder-Technik ist die Continuous-wave-Technik [15]. Der Unterschied liegt darin, dass die „Downpack-Phase“ in einer kontinuierlichen „Welle“ von 1-2 s Dauer, vollzogen wird. Ein weiterer Unterschied besteht darin, dass der Hitzeplugger nur bis 5 mm an die Arbeitslänge gebracht wird. Das bedeutet für den apikalen Anteil, dass es in diesem Bereich eine Single-cone Technik ist [42]. Ziel dieser Warmfülltechniken ist es, durch die plastische Verformung Irregularitäten und Seitenkanäle zu füllen und auf diese Weise den Guttaperchaanteil zu erhöhen, um möglichen Porositäten oder einer Schrumpfung des Sealers entgegenzuwirken. Goldberg et al. zeigten in ihrer Arbeit, dass eine signifikant höhere Anzahl an lateralen Kanälen mit einer warmen Obturationstechnik gefüllt wurden [40]. Eine weitere Studie zeigte, dass Wurzelkanalfüllungen mit Hilfe der Continuous-wave-Technik deutlich wandständiger waren als die der lateralen Kompaktion. Zudem war auch hier der Guttaperchaanteil signifikant höher [69]. Das Risiko eines Hitzeschadens der parodontalen umliegenden Gewebe wird in der Literatur kontrovers diskutiert. So konnten Sweatman et al. in ihrer Studie belegen, dass durch die Verwendung der Geräte *System B* und *Obtura II* kein extraradikulärer Temperaturanstieg um 10°C erreicht werden konnten [139]. Lipski kam zu einem anderen Ergebnis. Er konnte darlegen, dass während der Obturation mit dem *System B* Gerät unter

Anwendung der Continuous-wave-Technik auf der Wurzelaußenseite ein Temperaturanstieg um mehr als 10°C möglich ist [73]. Ein weiterer Nachteil der warmen Fülltechnik besteht in dem erhöhten Risiko einer apikalen Überpressung. Eine Studie hierzu zeigte, dass die warm-vertikale Kompaktion in einer signifikanten Zahl an apikalen Überfüllungen gegenüber der lateralen Kompaktion resultierte [77].

5 Problemstellung

Ziel dieser *In-vitro*-Studie war es, vier verschiedene Sealerplacement-Techniken hinsichtlich Penetrationstiefe, Homogenität und Vollständigkeit der Penetration in simulierte Seitenkanäle zu untersuchen. Die Auswertung der Ergebnisse erfolgte mit Hilfe von digitalen Röntgenbildern.

Dazu werden die folgenden Arbeitshypothesen aufgestellt:

1. Die Aktivierungstechniken haben einen Einfluss auf die Eindringtiefe des Sealers in die simulierten lateralen Ausbuchtungen.

2. Die Aktivierungstechniken zeigen unterschiedliche Homogenitäten hinsichtlich des Füllungsgrades der Ausbuchtungen.

3. Die Lokalisation der Mulden und Rillen zeigen einen Einfluss auf die Eindringtiefe des Sealers.

6 Material und Methode

6.1 Auswahl und Vorbereitung der Probenzähne

Es wurden 60 gerade, einwurzelige, unversehrte, extrahierte, humane Zähne ausgewählt. Das Wurzelwachstum sollte abgeschlossen sein und es durfte keine apikale Resorption vorliegen. Die Wurzeloberflächen wurden mittels Scalern von Zahnstein und Geweberesten vollständig gereinigt. Die Lagerung erfolgte in 0,5%iger Chloraminlösung.

6.2 Herstellung der Proben

Mit Hilfe einer diamantierten Trennscheibe (Horico, Berlin, Deutschland) wurden die Kronen der Zähne an der Schmelz-Zementgrenze abgetrennt. Die Arbeitslänge wurde optisch mit zu Hilfenahme eines Operationsmikroskops (Zeiss *Pico*) ermittelt. Es wurde eine K-Feile der Größe ISO 10 so weit in den Kanal eingebracht, dass die Spitze von außen gesehen werden konnte und von diesem Betrag wurde 1 mm abgezogen. Um ein möglichst reproduzierbares und einheitliches Ergebnis zu erzielen, wurden die Kanäle vollrotierend mit Hilfe des *FlexMaster*-Systems aufbereitet. Die Abschlusspräparation erfolgte durch eine *Mity Roto*-Feile der Größe ISO 80 auf volle Arbeitslänge. Die Spülung erfolgte mit 5 %iger NaOCl-Lösung und 40 %iger Zitronensäure-Lösung.

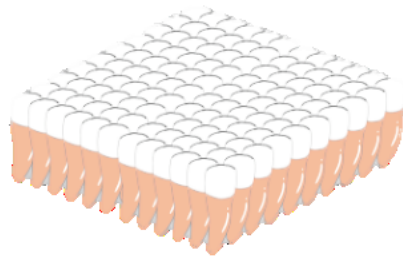
Abschließend wurden die Wurzeln präzise der Länge nach so gespalten, dass zwei gleichgroße Hälften entstanden.

6.3 Anlegen der Mulden und Rillen

Um auch hier ein gleichbleibendes und statistisch vergleichbares Ergebnis zu erzielen, wurde ein Silikonstopper (Dentsply Maillefer, Ballaigues, Schweiz) auf 2 mm Höhe mit *GrandioFlow* (Voco, Cuxhaven) auf einem Fissuren-Bohrer (Horico) fixiert. Mit Hilfe dieses modifizierten Bohrers wurden nun auf der einen Hälfte der Wurzel, 2 mm vor Apex beginnend, eine genormte Mulde von 8 mm Länge und 2 mm Tiefe angelegt. Auf der anderen Hälfte der Wurzel wurden vier genormte, punktförmige Löcher mit einer Tiefe von 2 mm im Abstand von 2, 4, 6 und 8 mm vom Apex entfernt angelegt. Die Wurzeln wurden mit Hilfe des Operationsmikroskops und Pinseln (Faber-Castell, Stein, Deutschland) intensiv von den entstandenen Spänen gereinigt.

Die so präparierten Wurzelhälften wurden im Anschluss wieder zusammengefügt und mit Klebewachs (*Supradent*, Schwedler, Bonn) stabil und dicht fixiert.

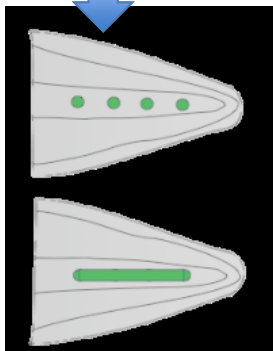
Abschließend wurden die Proben in Polyurethanharz (*Biresin G27*, Sika, Utrecht, Niederlande) eingebettet und mit einer Schraube und Mutter im Sinne eines Schraubstocks fixiert.



60 humane einwurzelige Zähne



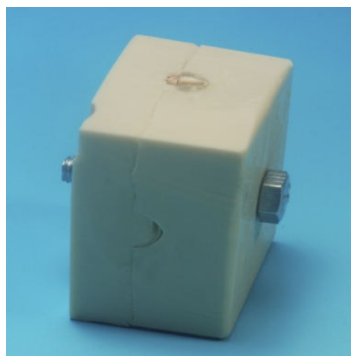
Aufbereitung bis Größe ISO 80



Anlegen der Mulden und Rillen



Verkleben beider Hälften



Einbetten in Epoxidharzblöcke

Abb. 3: Flowchart des Versuchaufbaus

6.4 Anpassen des Mastercones

Es wurde für jeden einzelnen Zahn ein konfektionierter Guttaperchastift der Größe ISO 80 (Coltène Whaledent, Langenau, Deutschland) so eingepasst, bis dieser eine Klemmpassung, so genanntes „Tug-Back“, also eine Friktion des Stiftes beim Einpassen in den Wurzelkanal auf Arbeitslänge aufwies.

6.5 Placement-Technik

Die 60 Zähne wurden entsprechend der unterschiedlichen Placement-Techniken in 4 Gruppen mit jeweils 15 Proben (n=15) aufgeteilt.

Gruppe 1:

Zum Einbringen des Sealers wurde der auf „Tug-Back“ zurechtgeschnittene Guttapercha-Masterpoint mit *AH Plus* benetzt und direkt in den Wurzelkanal eingebracht und koronal mit einem heißen Exkavator abgeschmolzen.

Gruppe 2:

In dieser Gruppe wurde der Sealer mittels einer benetzten Papierspitze in mehreren Bewegungen in den Wurzelkanal eingebracht. Die Wurzelfüllung erfolgte daraufhin durch das langsame Einführen des Masterpoints. Auch hier wurde der koronale Überschuss mit einem heißen Instrument abgeschmolzen.

Gruppe 3:

In Gruppe 3 wurde eine *Canal Brush* mit *AH Plus* benetzt. Das Einbringen erfolgte mittels Schallaktivierung ebenfalls in kontrollierten Auf-und-Ab-Bewegungen. Der Überschuss wurde mit einem erhitzten Instrument abgetrennt.

Gruppe 4:

In Gruppe 4 wurde ein Spreader mit Sealer beschickt. Das Applizieren erfolgte mittels Ultraschallaktivierung (EMS 600) für 10 s. Unmittelbar im Anschluss wurde der Überschuss mit einem heißen Stopfer entfernt.

Es wurde in allen Gruppen *AH Plus* gemäß den Herstellerangaben verwendet. Um eine exakte und reproduzierbare Sealermenge von 0,05 ml für jede Gruppe garantieren zu können, wurde der Sealer mit Hilfe einer Insulinspritze (Terumo U-40 Insulin, Terumo Europe, Leuven, Belgien) präzise portioniert.

Die Auswertung erfolgte erst nach einer Wartezeit von 48 Stunden. In dieser Zeit wurden die Proben feucht gelagert, um eine Aushärtung des Sealers sicher zu stellen.

6.6 Röntgenologische Auswertung

Es wurde von jeder Zahnwurzel ein orthoradiales Röntgenbild mit Hilfe eines digitalen Zahnfilmprogramms (*Digora*, Soredex, Helsinki, Finnland) angefertigt. Der Objektabstand betrug exakt 10 cm für jede Probe.

Anhand der Möglichkeit einer digitalen Analyse der Zahnfilme, konnte die Eindringtiefe in die Mulden und Rillen exakt vermessen werden. Als weiteren Parameter wurde die Homogenität des Sealers bewertet. Alle Daten wurden tabellarisch festgehalten und statistisch analysiert.

Die Beurteilung des gefüllten Volumens wurde in 3 Grade eingeteilt:

Grad 0: keine Füllung

Grad 1: gefüllt bis 50 %

Grad 2: gefüllt über 50 %

Die Einteilung der Homogenität erfolgte ebenfalls in 3 Grade:

Grad 0: keine Füllung

Grad 1: inhomogen

Grad 2: homogen

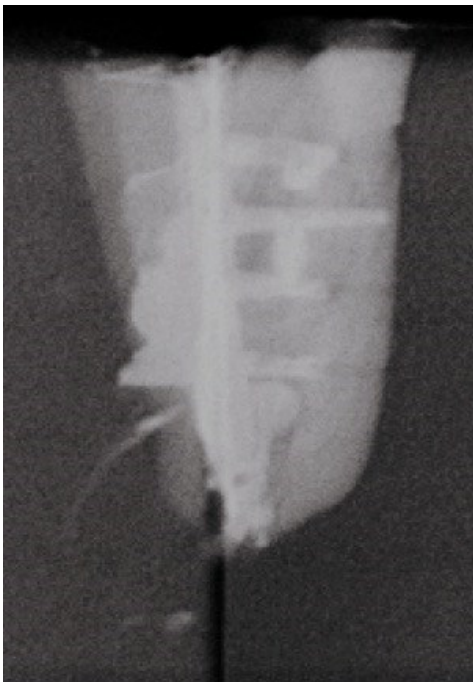
Im Anschluss wurde die Eindringtiefe des Sealers in Millimetern (mm) digital vermessen.



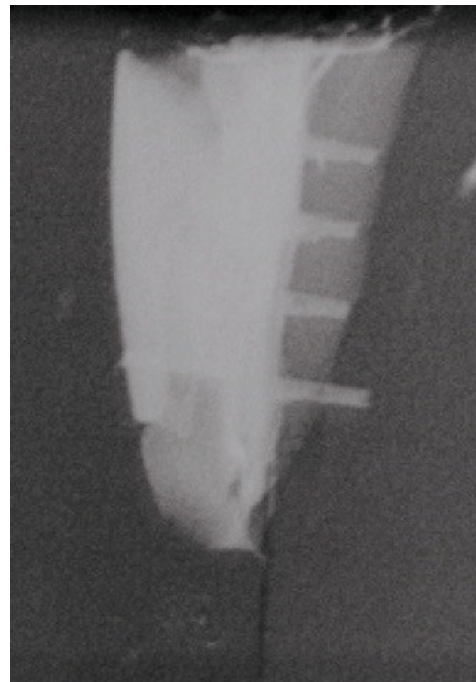
a)



b)



c)



d)

Abb. 4: Postoperative Röntgenbilder nach erfolgter Wurzelkanalfüllung. a) Lateralkanäle nicht gefüllt. b) homogene Füllung der Lateralkanäle weniger als 50% (Homogenität Grad 2, Füllung Grad 1). c) inhomogen gefüllte Lateralkanäle zu mehr als 50% gefüllt (Homogenität Grad 2, Füllung Grad 2). d) homogen gefüllte Lateralkanäle zu mehr als 50% gefüllt (Homogenität und Füllung Grad 2).

6.7 Statistische Auswertung

Die Auswertung der erhobenen Datensätze erfolgte mit Hilfe des Statistikprogrammes *SPSS Win 17.0* (SPSS Inc., Illinois, USA). Folgende Testverfahren wurden herangezogen:

- Kolmogorov-Smirnov-Test
- One-Way-ANOVA
- Post-Hoc-Test nach Student-Newman-Keuls
- Kruskal-Wallis-Test
- Mann-Whitney-Test
- Friedman-Test
- Wilcoxon-Test

Das allgemeine Signifikanzniveau wurde auf $p < 0,05$ festgelegt.

Der Kolmogorov-Smirnov-Test wurde für die Analyse der 4 experimentellen Gruppen auf Normalverteilung der Werte eingesetzt.

Zunächst erfolge die Analyse der Daten mittels parametrischen Tests (ANOVA und Post-hoc-Tests nach Student-Newman-Keuls analysiert. Aufgrund der Tatsache, dass hierbei bei einigen Gruppen keine Normalverteilung der Sealerpenetrationstiefen vorlag, wurde nachfolgend mittels nicht-parametrischer Testverfahren analysiert. Dazu kam zunächst der Kruskal-Wallis-Test (Analyse von Unterschieden der Penetrationstiefen zwischen den 4 Aktivierungstechniken in den 4 verschiedenen Kanalabschnitten für Mulden und Rillen sowie Mulden resp. Rillen gesamt), gefolgt vom Mann-Whitney-Test (paarweiser Vergleich der Penetrationstiefen in Mulden sowie Rillen der verschiedenen Kanalabschnitte sowie Mulden resp. Rillen gesamt) für die Analyse unabhängiger Stichproben zum Einsatz. Der Friedman-Test (Vergleich der Penetrationstiefen zwischen den verschiedenen Kanalabschnitten innerhalb der jeweiligen Gruppen) gefolgt vom Wilcoxon-Test bei abhängigen Stichproben (paarweise Analyse von Penetrationstiefen zwischen den verschiedenen Kanalabschnitten innerhalb der jeweiligen Gruppen) zum Einsatz kamen.

7 Ergebnisse

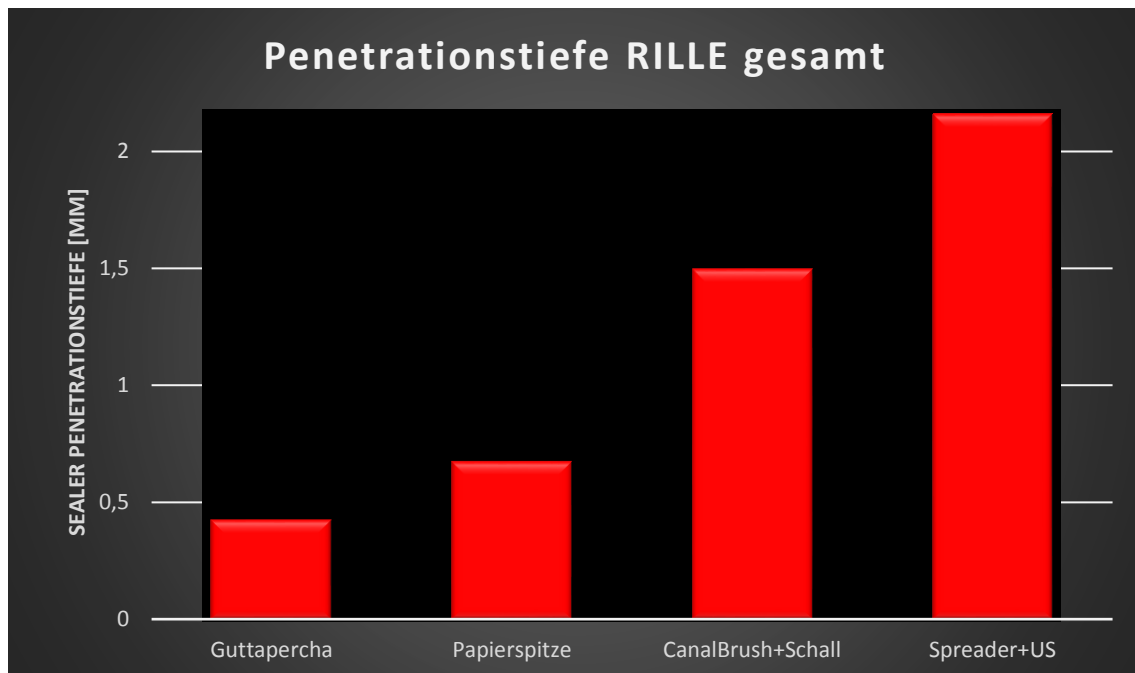


Abb. 5: Durchschnittliche Penetrationstiefe von Sealer in die Rillen in Abhängigkeit von der Placement-Technik

Abbildung 5 zeigt deutliche Unterschiede der Durchschnittswerte für die Penetrationstiefe von Sealer in die artifiziell angelegten Rillen. Die Schall- und Ultraschallgruppe erzielten insgesamt signifikant höhere Werte als die manuellen Techniken mit Guttapercha und Papierspitze (Kruskal-Wallis-Test, $p < 0,001$). Die effektivste Methode war die Ultraschallaktivierung. Diese erreichte einen Durchschnittswert von 2,16 mm, gefolgt von der *CanalBrush* angetrieben mit Schall, die eine durchschnittliche Penetration von 1,50 mm aufwies. Das Einbringen des Sealers mit einem Guttaperchastift erreichte durchschnittlich 0,43 mm und zeigte damit die geringste Effizienz aller Placementtechniken (Abb. 5).

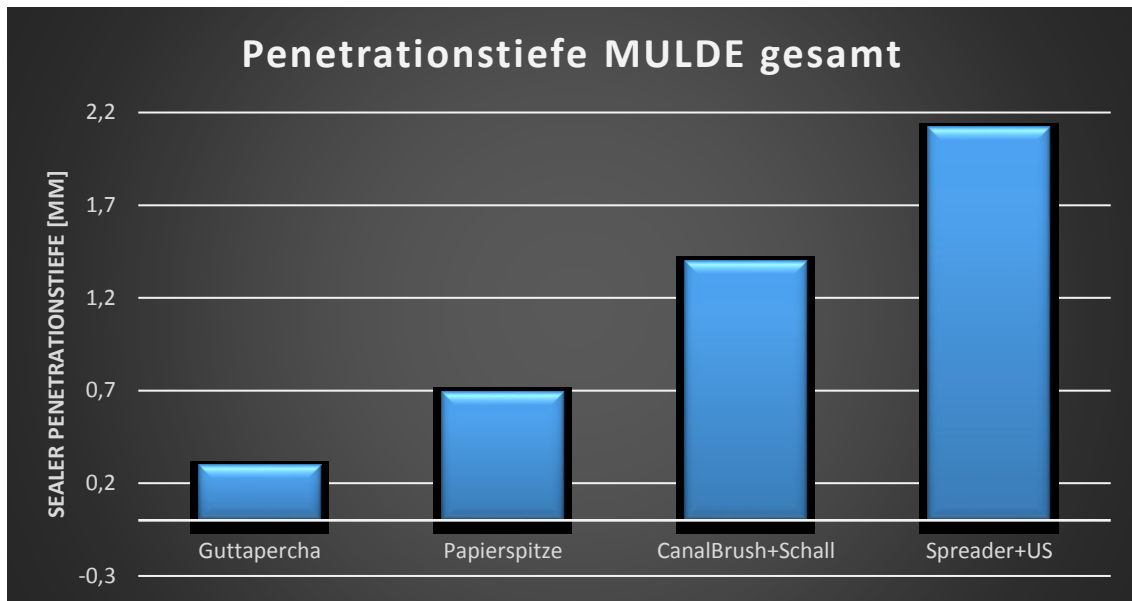


Abb. 6: Durchschnittliche Penetrationstiefe von Sealer in die Mulden in Abhängigkeit von der Placement-Technik

Die Ultraschallgruppe zeigte auch für die Analyse der Eindringtiefe in den Mulden insgesamt die besten Ergebnisse und erreichte hier mit 2,12 mm fast identische Werte wie die Rillen. In Abbildung 6 ist deutlich zu erkennen, dass die Guttapercha-Methode auch hier wieder die geringste Eindringtiefe (0,29 mm) erreichte und auch statistisch waren die Unterschiede zwischen den vier Placementtechniken bei signifikant (Kruskal-Wallis-Test, $p < 0,001$).

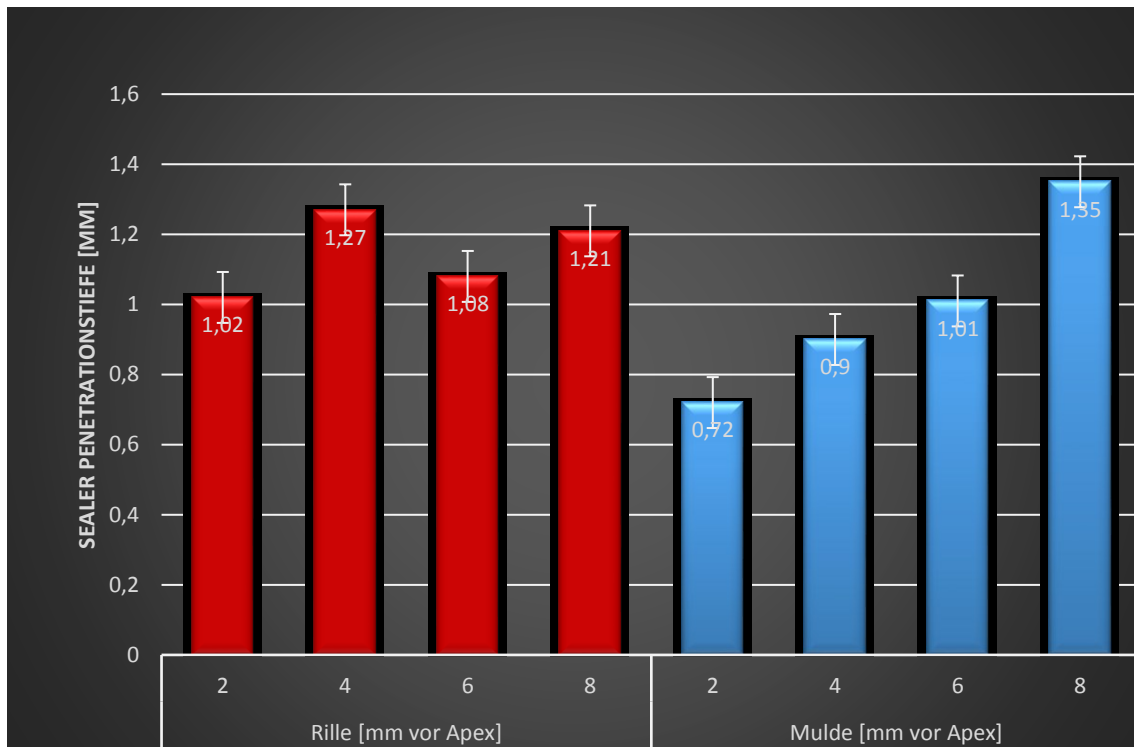


Abb. 7: Penetrationstiefe von Sealer in Rillen und Mulden im Vergleich

In Abbildung 7 ist bei der Darstellung der kanalabschnittsbezogenen Auswertung der Sealerpenetrationstiefe über sämtliche Placementtechniken hinweg zu erkennen, dass die Mulden im koronalen Abschnitt (8 mm) eine höhere Penetrationstiefe aufwiesen als jene im apikalen Kanalabschnitt. Dabei nahmen die Werte nach apikal hin kontinuierlich ab. Der geringste Wert wurde 2 mm vor Apex mit einer Eindringtiefe von 0,72 mm ermittelt. Anders sah dies für die simulierten Ausbuchtungen (Rillen) aus. Hier verteilte sich der Sealer weitestgehend gleichmäßig über die gesamte Länge. Der höchste Wert wurde auf 4 mm entfernt vom Apex mit einer Tiefe von 1,27 mm erreicht.

Tab. 1: Darstellung der Mittelwerte, der Standardabweichung der Sealerpenetrationstiefen von Rillen und Mulden pro Wurzelkanalabschnitt und gesamt sowie den Signifikanzwerten für den Vergleich der 4 Gruppen (Kruskal-Wallis-Test).

	Sealerpenetrationstiefe [mm]									
	Rille 2 mm	Rille 4 mm	Rille 6 mm	Rille 8 mm	Rille gesamt	Mulde 2 mm	Mulde 4 mm	Mulde 6 mm	Mulde 8 mm	Mulde gesamt
Gruppe 1 (Guttapercha)										
Mittelwert [mm]	0,43	0,30	0,33	0,66	0,43	0,07	0,14	0,37	0,71	0,32
SD [mm]	0,56	0,38	0,44	0,70	0,38	0,16	0,23	0,42	0,81	0,34
Gruppe 2 (Papierspitze)										
Mittelwert [mm]	0,50	0,56	0,76	0,99	0,70	0,41	0,56	0,73	1,38	0,77
SD [mm]	0,37	0,55	0,57	0,80	0,48	0,24	0,34	0,82	1,07	0,49
Gruppe 3 (Schall)										
Mittelwert [mm]	1,47	1,43	1,53	1,58	1,50	0,82	1,01	1,50	2,26	1,40
SD [mm]	0,64	0,59	0,57	0,66	0,56	0,49	0,73	0,99	0,76	0,57
Gruppe 4 (Ultraschall)										
Mittelwert [mm]	2,39	1,92	2,08	2,24	2,16	1,81	1,96	2,08	2,61	2,12
SD [mm]	0,97	0,74	0,83	0,89	0,71	0,83	0,49	0,60	0,87	0,47
Kruskal-Wallis-Test	<0,001*	<0,001*	<0,001*	<0,001*	<0,001*	<0,001*	<0,001*	<0,001*	<0,001*	<0,001*

Die Analyse der Penetrationstiefenwerte zeigte, dass nicht in allen Fällen eine Normalverteilung gegeben war. Daher wurden nachfolgend nicht-parametrische Testverfahren nach Kruskal-Wallis und Mann-Whitney eingesetzt. Die Penetrationstiefe von Sealer in die Rillen und Mulden war abhängig von der Placementtechnik und der Lokalisation der Ausbuchtungen und zeigte in allen Kanalabschnitten sowie für Rillen und Mulden insgesamt signifikante Unterschiede zwischen den experimentellen Gruppen (Tab. 1). Generell wurden in den beiden aktivierten Gruppen hinsichtlich der Sealerpenetrationstiefe beider Formen lateraler Ausbuchtungen signifikant höhere Mittelwerte für die Sealerpenetrationstiefe ermittelt (Tab. 1), wobei die Ultraschallaktivierung durchweg die höchsten Werte zeigte. Die Analyseergebnisse der paarweisen Vergleiche mittels Mann-Whitney-Test sind in Tabelle 2 nach den vier verschiedenen Kanalabschnitten getrennt sowie für Rillen und Mulden insgesamt dargestellt. Die Ergebnisse der statistischen Analyse der regionalen Unterschiede hinsichtlich der Sealerpenetrationstiefe innerhalb der vier experimentellen Gruppen für alle Kanalabschnitte gemeinsam (Friedman-Test) sowie die Ergebnisse der nachfolgend durchgeführten paarweisen Analyse von jeweils zwei Kanalabschnitten (Wilcoxon-Test) sind in Tabelle 3 aufgeführt.

Tab. 2: Paarweiser Vergleich der Sealerpenetrationstiefen zwischen den vier experimentellen Gruppen (Mann-Whitney-Test) in den vier Kanalabschnitten für Mulden und Rillen in den Kanalabschnitten sowie Mulden und Rillen insgesamt.

Form der Ausbuchtung: Rille					
Lokalisation	Gruppe	1	2	3	4
2 mm	1		p = 0,254	p < 0,001*	p < 0,001*
	2	p = 0,254		p < 0,001*	p < 0,001*
	3	p < 0,001*	p < 0,001*		p = 0,021*
	4	p < 0,001*	p < 0,001*	p = 0,021*	
4 mm	1		p = 0,125	p < 0,001*	p < 0,001*
	2	p = 0,125		p < 0,001*	p < 0,001*
	3	p < 0,001*	p < 0,001*		p = 0,051
	4	p < 0,001*	p < 0,001*	p = 0,051	
6 mm	1		p = 0,019*	p < 0,001*	p < 0,001*
	2	p = 0,019*		p = 0,002*	p < 0,001*
	3	p < 0,001*	p = 0,002*		p = 0,036*
	4	p < 0,001*	p < 0,001*	p = 0,036*	
8 mm	1		p = 0,260	p = 0,001*	p < 0,001*
	2	p = 0,260		p = 0,026*	p = 0,001*
	3	p = 0,001*	p = 0,026*		p = 0,029*
	4	p < 0,001*	p = 0,001*	p = 0,029*	
gesamt	1		p = 0,110	p < 0,001*	p < 0,001*
	2	p = 0,110		p = 0,001*	p < 0,001*
	3	p < 0,001*	p = 0,001*		p = 0,014*
	4	p < 0,001*	p < 0,001*	p = 0,014*	
Form der Ausbuchtung: Mulde					
Lokalisation	Gruppe	1	2	3	4
2 mm	1		p < 0,001*	p < 0,001*	p < 0,001*
	2	p < 0,001*		p = 0,013*	p < 0,001*
	3	p < 0,001*	p = 0,013*		p = 0,001*
	4	p < 0,001*	p < 0,001*	p = 0,001*	
4 mm	1		p = 0,001*	p < 0,001*	p < 0,001*
	2	p = 0,001*		p = 0,114	p < 0,001*
	3	p < 0,001*	p = 0,114		p = 0,001*
	4	p < 0,001*	p < 0,001*	p = 0,001*	
6 mm	1		p = 0,194	p < 0,001*	p < 0,001*
	2	p = 0,194		p = 0,004*	p < 0,001*
	3	p < 0,001*	p = 0,004*		p = 0,046*
	4	p < 0,001*	p < 0,001*	p = 0,046*	
8 mm	1		p = 0,071	p < 0,001*	p < 0,001*
	2	p = 0,071		p = 0,017*	p = 0,004*
	3	p < 0,001*	p = 0,017*		p = 0,184
	4	p < 0,001*	p = 0,004*	p = 0,184	
gesamt	1		p = 0,002*	p < 0,001*	p < 0,001*
	2	p = 0,002*		p = 0,005*	p < 0,001*
	3	p < 0,001*	p = 0,005*		p = 0,001*
	4	p < 0,001*	p < 0,001*	p = 0,001*	

Tab. 3: Ergebnisse der statistischen Analyse der Sealerpenetrationstiefe (abhängige Stichproben) in den vier experimentellen Gruppen zwischen den einzelnen Kanalabschnitten mittels Friedman-Test (alle Kanalabschnitte) sowie Wilcoxon-Test (paarweiser Vergleich aller Kanalabschnitte).

Gruppe	Form der Ausbuchtung: Rillen			Form der Ausbuchtung: Mulden		
	Lokalisation A	Lokalisation B	Wilcoxon-Test	Lokalisation A	Lokalisation B	Wilcoxon-Test
1	2 mm	4 mm	p = 0,386	2 mm	4 mm	p = 0,225
	2 mm	6 mm	p = 0,508	2 mm	6 mm	p = 0,021*
	2 mm	8 mm	p = 0,306	2 mm	8 mm	p = 0,002*
	4 mm	6 mm	p = 0,735	4 mm	6 mm	p = 0,015*
	4 mm	8 mm	p = 0,050*	4 mm	8 mm	p = 0,001*
	6 mm	8 mm	p = 0,092	6 mm	8 mm	p = 0,024*
	Friedman-Test: p = 0,217			Friedman-Test: p < 0,001*		
2	2 mm	2 mm	p = 0,780	2 mm	2 mm	p = 0,014*
	2 mm	2 mm	p = 0,209	2 mm	2 mm	p = 0,069
	2 mm	2 mm	p = 0,021*	2 mm	2 mm	p = 0,001*
	4 mm	4 mm	p = 0,023*	4 mm	4 mm	p = 0,780
	4 mm	4 mm	p = 0,013*	4 mm	4 mm	p = 0,006*
	6 mm	6 mm	p = 0,208	6 mm	6 mm	p = 0,041*
	Friedman-Test: p = 0,022*			Friedman-Test: p < 0,001*		
3	2 mm	4 mm	p = 0,683	2 mm	4 mm	p = 0,196
	2 mm	6 mm	p = 0,495	2 mm	6 mm	p = 0,020*
	2 mm	8 mm	p = 0,470	2 mm	8 mm	p = 0,001*
	4 mm	6 mm	p = 0,201	4 mm	6 mm	p = 0,036*
	4 mm	8 mm	p = 0,271	4 mm	8 mm	p = 0,002*
	6 mm	8 mm	p = 0,820	6 mm	8 mm	p = 0,005*
	Friedman-Test: p = 0,344			Friedman-Test: p < 0,001*		
4	2 mm	4 mm	p = 0,035*	2 mm	4 mm	p = 0,443
	2 mm	6 mm	p = 0,293	2 mm	6 mm	p = 0,320
	2 mm	8 mm	p = 0,609	2 mm	8 mm	p = 0,027*
	4 mm	6 mm	p = 0,426	4 mm	6 mm	p = 0,157
	4 mm	8 mm	p = 0,140	4 mm	8 mm	p = 0,015*
	6 mm	8 mm	p = 0,443	6 mm	8 mm	p = 0,041*
	Friedman-Test: p = 0,437			Friedman-Test: p = 0,005*		

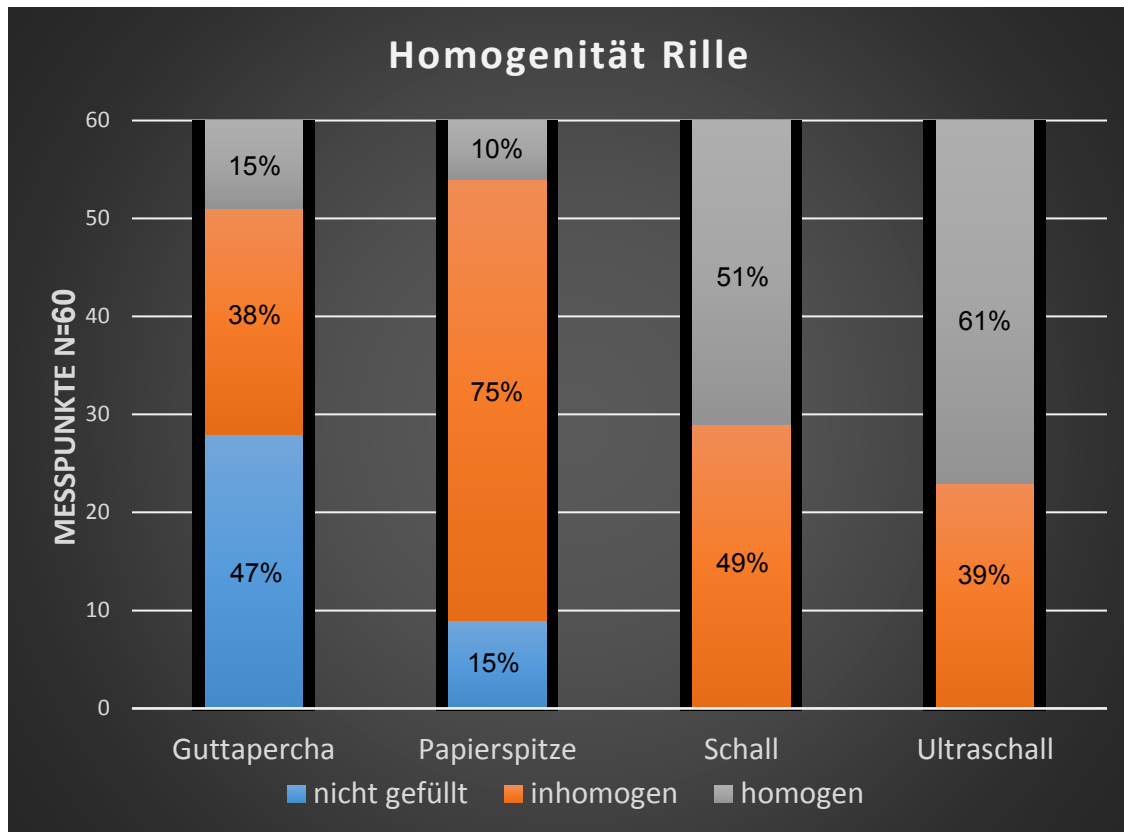


Abb. 8: Homogenität der Füllung in Rillen

Betrachtet man die Ergebnisse für die Analyse für die Homogenität in den Rillen (Abb. 8), so ist festzuhalten, dass alle Techniken eher geringe Werte erzielten und somit für diesen Parameter eine niedrige Effektivität aufweisen. Die signifikant besten Ergebnisse waren für die Ultraschallgruppe zu verzeichnen. Diese Technik konnte in 37 von 60 Fällen (= 61%) die Rillen homogen füllen, wohingegen in der Papierspitzenengruppe nur 6 von 60 Messstellen (= 15%) homogen gefüllt wurden.

Zudem waren bei den aktivierten Techniken (Schall und Ultraschall) im Vergleich zu den nicht aktivierten Techniken keine ungefüllten Rillen beobachtet worden.

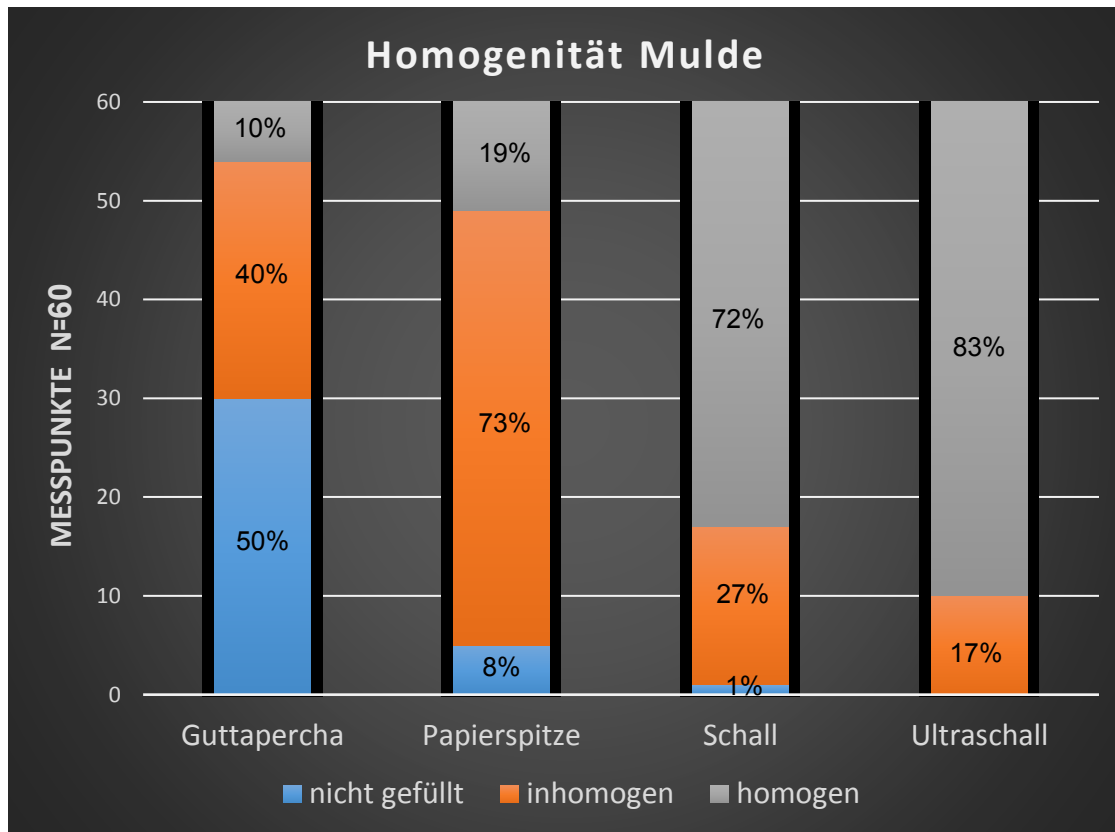


Abb. 9: Homogenität der Füllung in Mulden

Abbildung 9 zeigt, dass die Schallaktivierung in den Mulden deutlich homogenere Füllungen produzierte als in den Rillen. Signifikant bessere Ergebnisse erreichte auch hier wieder die Ultraschallaktivierung. Hier wurden 50 von 60 Messpunkte (= 83%) homogen gefüllt. Die Grafik zeigt auch, dass die Schallgruppe 1 Messpunkt (= 1%) nicht füllen konnte. Die Technik mit Papierspitze erreichte 11 von 60 (= 19%) homogen gefüllte Mulden. 5 von 60 Messpunkten (= 8%) konnten überhaupt nicht gefüllt werden. Im Vergleich hierzu zeigte die Guttapercha-Gruppe den jedoch signifikant schlechtesten Wert. Hier wurden 30 der 60 Fälle (= 50%) nicht gefüllt. Lediglich 6 von 60 gemessene Stellen (= 10%) konnten homogen gefüllt werden.

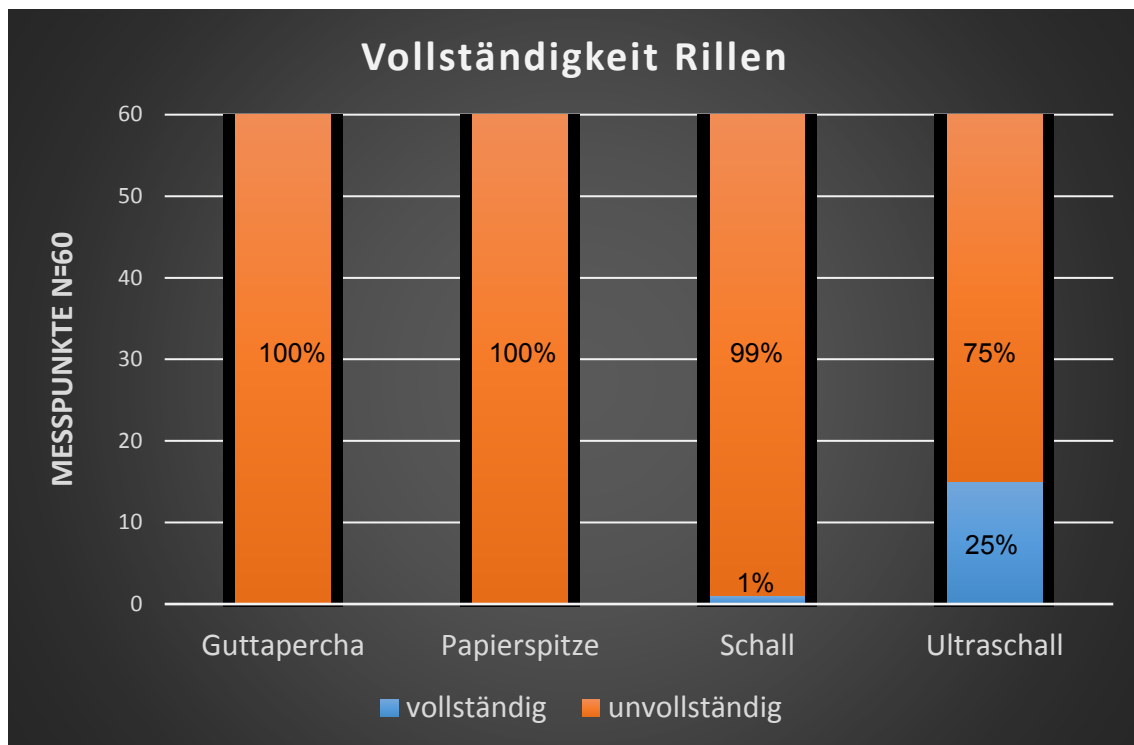


Abb. 10: Vollständigkeit der Füllung in Rillen in Abhängigkeit von der Placementtechnik

Betrachtet man isoliert die Vollständigkeit der gefüllten Rillen, lässt sich in Abbildung 10 erkennen, dass alle Gruppen sehr ineffektiv im vollständigen Befüllen der artifizuell angelegten Ausbuchtungen und lateralen Kanäle waren. Die Ultraschallgruppe erreichte mit 15 von 60 vollständig gefüllten Messpunkten (= 25%) die besten Werte. Mittels der manuellen Gruppen war es nicht möglich vollständig gefüllte Rillen zu erreichen.

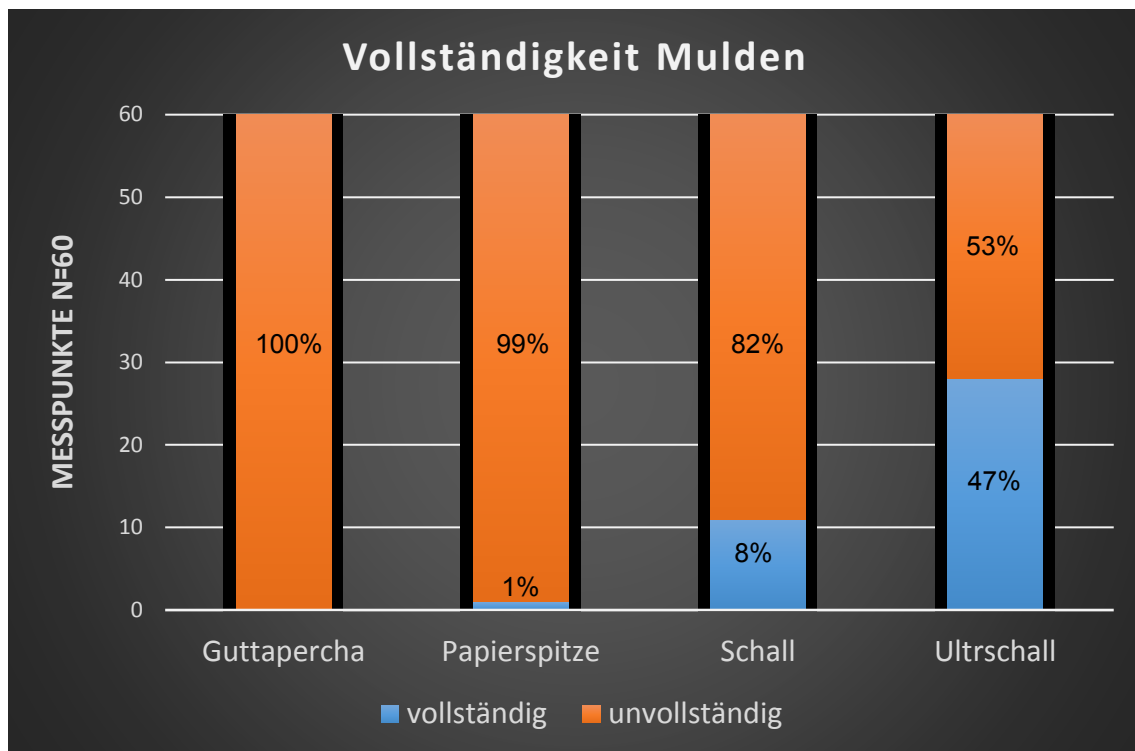


Abb. 11: Vollständigkeit der Füllung in Mulden in Abhängigkeit von der Placemementtechnik

Das gleiche gilt für das vollständige Füllen der Mulden (Abb. 11). Mit der Guttapercha-Technik konnte keine Mulde vollständig gefüllt werden. Die Papierspitzen-Methode schaffte lediglich 1 aus 60 Stellen (= 1%) vollständig zu füllen. Mit Hilfe der Ultraschalltechnik konnten hingegen 28 von 60 gemessenen Stellen (= 47%) vollständig gefüllt werden. Die Schallmethode erreichte mit 11 von 60 (= 8%) gefüllten Ausbuchtungen den zweitbesten Wert.

8 Diskussion

8.1 Ziele

Viele Studien haben sich mit der Sealer-Penetration in Abhängigkeit der Aktivierungsmethode der Spülflüssigkeit beschäftigt [12, 145]. Jedoch gibt es nur sehr wenige Arbeiten, die einen Zusammenhang der Eindringtiefe von Sealer und der Placement-Technik untersucht haben.

In dieser Arbeit wurde daher der Frage nachgegangen, inwieweit unterschiedliche Sealer-Placement-Techniken im Rahmen einer simulierten klinischen Situation mit einem standardisierten Versuchsaufbau, möglichst unbeeinflusst durch die Wurzelfülltechnik, in der Lage sind, simulierte laterale Kanäle und Ausbuchtungen zu füllen. Der Sinn des Einsatzes von Aktivierungstechniken im Rahmen der Sealerapplikation ergibt sich aus der Tatsache heraus, dass insbesondere bei Kaltfülltechniken dieser Moment während der Wurzelkanalfüllung die einzige Möglichkeit darstellt, laterale Ausbuchtungen zu verschließen und damit Hohlräume im Wurzelkanalsystem zu reduzieren.

Die Aussagekraft von *In-vitro*-Studien wird unter Fachleuten häufig kritisch bewertet. Das vorherrschende Argument ist, dass die klinische Situation lediglich simuliert wird und nicht direkt mit der klinischen Situation vergleichbar sei. Der deutliche Vorteil einer *In-vitro*-Studie gegenüber einer *In-vivo*-Untersuchungen ist jedoch die sehr präzise zu gestaltende Standardisierung fast aller Parameter des Versuchsaufbaues in den einzelnen experimentellen Gruppen. In der Literatur sind nur sehr vereinzelt experimentelle Studien vorhanden, die sich mit Techniken der Sealer-Applikation befassen [5, 45, 89]. Diese Untersuchungen verwendeten fast ausschließlich die laterale Kompaktion als Obturationsmethode, welche zusätzlich Einfluss auf die Eindringtiefe des Sealers in Irregularitäten nimmt und somit eine reine Bewertung der Applikationsmethode unmöglich macht. Auch ist ein direkter Vergleich zwischen manuellen und sowie schall- und ultraschallaktivierten Verfahren nicht beschrieben. Es wurden für diese *In-vitro*-Studie humane Zähne gewählt, da die Morphologie und die oberflächliche Beschaffenheit der Dentinwände eine erhebliche Rolle für das

Anfließverhalten des Sealers spielt. Dies lässt sich mit Acrylblöcken nicht in derselben Weise simulieren.

8.2 Prüfung der Arbeitshypothesen

1. Die Aktivierungstechniken haben einen Einfluss auf die Eindringtiefe des Sealers in die simulierten lateralen Ausbuchtungen.

*Diese Hypothese wird **angenommen**.*

Eine der Fragestellungen dieser *In-vitro*-Untersuchung war es zu prüfen, ob Aktivierungstechniken einen Einfluss auf die Eindringtiefe des Sealers in simulierte laterale Ausbuchtungen haben. Anhand der beschriebenen Ergebnisse kann diese Hypothese angenommen werden. Es besteht ein signifikanter Unterschied unter den Versuchsgruppen. Die effektivste Methode war die Aktivierung mit Ultraschall die eine mittlere Eindringtiefe in die Rillen von 2,16 mm erreichte. Das Einbringen mit Hilfe eines Guttaperchastiftes erreichte lediglich einen Mittelwert von 0,29 mm.

2. Die Aktivierungstechniken zeigen unterschiedliche Homogenitäten hinsichtlich des Füllungsgrades der Ausbuchtungen.

*Diese Hypothese wird **angenommen**.*

Die Auswertung der Ergebnisse ob die Homogenität des Sealers in den gefüllten Ausbuchtungen von der Aktivierungsmethode abhängig ist, zeigte sich eine deutliche Signifikanz zwischen den manuellen und den aktivierten Placement-Techniken. Die Ultraschallaktivierung und die Schallaktivierung erreichten als Medianwerte in die Rillen 61% und 51% homogen gefüllte laterale Kanäle. Das Einbringen mit Papierspitze und Guttaperchastift war signifikant schlechter, mit Ergebnissen von 10% und 15%. Die Ergebnisse der Mulden zeigten exakt umgekehrte Werte für die Papierspitzen- und Guttapercha-Gruppe. In der Ultraschallgruppe waren 83% der angelegten Mulden homogen gefüllt. Anhand

dieser Auswertung kann auch diese Arbeitshypothese im Rahmen dieser Untersuchung angenommen werden.

3. Die Lokalisation der Mulden und Rillen zeigen einen Einfluss auf die Eindringtiefe des Sealers.

*Diese Hypothese wird **abgelehnt**.*

Ein weiteres Ziel dieser Studie war es herauszufinden, inwieweit die Lokalisation der Mulden und Rillen einen Einfluss auf die Eindringtiefe des Sealers haben. Für die Mulden kann diese Hypothese angenommen werden, da ein kontinuierlicher Anstieg an gefüllten Arealen von apikal nach koronal zu verzeichnen war (0,72 mm - 1,35 mm). Für die Rillen muss diese Arbeitshypothese, anhand der Ergebnisse abgelehnt werden, da für die Abstände vom Apex gemessen keine Tendenz zulassen.

8.3 Diskussion der Methodik

Auswahl der Zähne

Für diese Studie wurden gerade, einwurzelige, humane Zähne ausgewählt. Das Alter oder Geschlecht der Zähne fand dabei keine Berücksichtigung. Die Zähne sollten ein abgeschlossenes Wurzelwachstum haben, keine Anzeichen einer Resorption oder einer Fraktur aufweisen. Zähne mit Wurzelkaries oder mit einer bereits erfolgten Wurzelkanalfüllung wurden ebenfalls ausgeschlossen. Die Zähne wurden vor Versuchsbeginn in 0,5%iger Chloramin-T-Lösung gelagert. Auf Basis dieser selektierenden Parameter blieben 60 möglichst einheitliche Zähne mit geradem Wurzelverlauf und nur einem Wurzelkanal übrig.

Wurzelkanalpräparation

Die Zahnkronen der ausgewählten Zähne wurden an der Schmelz-Zement-Grenze von der Wurzel abgetrennt. Unter Zuhilfenahme eines Operationsmikroskops erfolgte die Bestimmung der Arbeitslänge visuell mit einer K-Feile der ISO Größe 10 und wurde auf 1 mm vor Apex festgelegt. Die Wurzelkanalpräparation wurde maschinell mit dem *FlexMaster*-System durchgeführt. Um einen möglichst reproduzierbaren runden Wurzelkanalquerschnitt mit einem hohen Anteil an präparierten Kanalwänden zu erhalten, wurde der Kanal abschließend mit einer *Mity Roto*-Feile auf eine ISO-Größe von 80 erweitert. Durch die Wahl der Aufbereitungsgröße und den Einsatz maschineller Feilensysteme konnten Formabweichungen und manuelle Aufbereitungsfehler ausgeschlossen werden. Die Arbeit von Sonntag et al. zeigte, dass eine manuelle Aufbereitung mit Stahlfeilen signifikant mehr Fehler und Unebenheiten produziert [134].

Standardisierung der Mulden und Rillen

Im Anschluss an die Wurzelkanalaufbereitung wurden die humanen Wurzeln der Länge nach gespalten, so dass zwei identische Hälften entstanden. Da sich 73% der akzessorischen Kanäle im apikalen Drittel befinden [147], hat diese Region eine klinische Relevanz. Daher erfolgte die Bohrung der Rillen 2 mm, 4 mm und 6 mm vom Apex entfernt mit Hilfe eines Fissuren-Diamanten und einem Durchmesser von 0,15 mm. Dieser Versuchsaufbau wurde bereits in den Untersuchungen von Goldberg et al. [41] und Pecora et al. [97] beschrieben. Da im mittleren Wurzelkanaldrittel noch immer 11% Seitenkanäle zu finden sind [147], wurde 8 mm entfernt vom Apex noch ein zusätzlicher lateraler Kanal angelegt um eine präzisere Bewertung der einzelnen Placement-Techniken treffen zu können. In der anderen Wurzelhälfte wurde, um klinisch nicht instrumentierte Bereiche oder Ausbuchtungen zu simulieren, eine Mulde im Bereich 2 bis 8 mm vom Apex entfernt geschaffen. Das Anlegen der Mulde erfolgte ebenfalls mit Hilfe des Diamant-Fissurenbohrers. Um reproduzierbare Mulden und Rillen von 2 mm Tiefe zu erhalten wurde ein Silikon-Stopper mit *Grandio Flow* auf dem Diamantbohrer stabil fixiert.

Wurzelkanalspülung

Durch die Instrumentierung des Wurzelkanals entsteht ein Smear layer [48]. Dieser besitzt einen oberflächlichen Anteil mit etwa 1-2 μm und einen tiefen Anteil, der bis zu 40 μm in die Dentintubuli reicht [143]. Er ist unstrukturiert in seinem Aufbau und besteht aus Odontoblastenfortsätze, Gewebereste, Dentinspäne und im Falle eines infizierten Zahns auch Mikroorganismen [143]. Ein Belassen der Schmierschicht macht es unmöglich, darunterliegende Mikroorganismen zu eliminieren. Eine Smear-layer-Entfernung führt zu einer besseren apikalen und koronalen Abdichtung. Die Adaptation des Sealers an das Wurzelkandentin ist auch positiv beeinflusst, wenn der Smear layer entfernt wurde [22, 122]. Da der Smear layer aus organischen und anorganischen Anteilen besteht wird ein Spülprotokoll bestehend aus Natriumhypochlorit und einem Chelatbildner wie etwa EDTA oder Zitronensäure benötigt [48]. Abgesehen von der biologischen Komponente ist es obligat, die Schmierschicht zu entfernen, um laterale Kanäle und Irregularitäten überhaupt füllen zu können. So kamen auch Petschelt et al. in Ihrer Arbeit zu dem Ergebnis, dass eine Entfernung der Schmierschicht positiv für die Dichtigkeit der Wurzelkanalfüllung ist [99]. Im Rahmen dieser Studie erfolgte die Entfernung der Schmierschicht mit der Kombination aus Natriumhypochlorit und Zitronensäure. Die Spülung wurde mit einer herkömmlichen Spritze und Kanüle durchgeführt. Die Spülmenge und Reihenfolge wurde standardisiert. Kritisch ist zu bewerten, dass eine Aktivierung der Spüllösungen zu einer signifikant effektiveren Smear layer-Entfernung führt [13], auch wenn die Effektivität von koronal nach apikal abnimmt [11]. Eine abschließende Trocknung der Proben wurde durch eine finale Spülung mit Ethylalkohol erreicht.

Sealer

In dieser Studie wurde *AH Plus* als Sealer verwendet. Diese Wurzelkanalfüllpaste auf Epoxidharzbasis stellt gegenwärtig den am besten untersuchten Sealer dar. Dieser wird in der Literatur als Goldstandard beschrieben [124], auch wenn aktuelle Studien sehr vielversprechende Ansätze für biokeramische Sealer aufzeigen, kann zum jetzigen Zeitpunkt noch keine Aussage über die Langzeitprognose dieser Sealer getroffen werden. *AH Plus* weist eine sehr hohe

Volumenstabilität [39] und eine sehr gute Adhäsion zum Dentin auf [81]. Guinesi et al. bestätigen auch ein blasenfreies Abdichten unter der Verwendung der Einstiftmethode, wenn der Sealer mit einer Handfeile eingebracht wird [46]. Eine große Kontaktfläche zwischen Sealer und Wurzelkanalwand ist essentiell für ein zuverlässiges Abdichten des Wurzelkanalsystems. Die Fähigkeit eines Sealers, Irregularitäten auszufüllen und in Dentintubuli zu fließen, wird von der Fließfähigkeit bestimmt [10]. Diese wiederum wird durch die Temperatur, den Querschnitt des Wurzelkanals und vor allem durch die Korngröße des Sealers beeinflusst [94]. Balguerie et al. verglichen Sealer der Stoffklassen Calciumhydroxid, Zinkoxid-Eugenol, Glasionomer-Zement, Silikon und Epoxidharz auf ihre Penetrationsfähigkeit in Dentintubuli. Sie beschrieben in ihrer Arbeit, dass die Fähigkeit des Sealers in Dentintubuli einzudringen maßgeblich von den chemischen und physikalischen Eigenschaften abhängig ist. Die Ergebnisse zeigten, dass *AH Plus* allen anderen Sealern deutlich überlegen war [6]. Siqueira et al. verglichen in Ihrer Studie bereits etablierte Sealer mit neueren Generationen und bestätigten ebenfalls für *AH Plus* die effektivste Penetrationsfähigkeit [130]. Eine aktuelle Studie untersuchte Tricalciumsilikat-Sealer auf ihre Penetrationsfähigkeit in Dentintubuli. Die Wurzelkanalfüllung erfolgte entweder mit der Single-cone-Technik oder der warmen vertikalen Kompaktion. Die Ergebnisse ergaben, dass diese Sealer auf MTA-Basis bis zu einer Tiefe von 2 mm bis an die Dentin-Zementgrenze eindringen konnten. Die Autoren schlussfolgerten dementsprechend, dass Sealer auf Silikat-Basis sehr effektiv im Füllen von lateralen Kanälen und Dentintubuli sind [80]. Eine andere Studie untersuchte die Eindringtiefe von zwei verschiedenen kompositbasierten Sealern (*Resilon/Epiphany* und *Resilon/Epiphany SE*) und *AH Plus* hinsichtlich ihrer Fähigkeit, in Dentintubuli einzudringen. Die Analyse der Ergebnisse zeigte ein signifikant effektiveres Eindringen von *Resilon/Epiphany* in die Dentintubuli unter der Voraussetzung, dass die Schmierschicht zuvor entfernt wurde [123].

Sealerapplikation

Es wurden im Rahmen dieser Studie vier verschiedene Sealerplacement-Techniken auf ihre Effektivität analysiert, simulierte laterale Kanäle und Mulden zu füllen. Zwei manuelle Techniken, Guttaperchapoint und Papierspitzte und zwei

aktivierte Techniken, schallaktiviert und ultraschallgestützt. Um vergleichbare Proben zu erhalten und möglichst viele Fehlerquellen ausschließen zu können, wurde die Applikationsmenge über eine Insulinspritze und die Applikationsparameter (Aktivierungsintensität, Aktivierungsdauer und Aktivierungsansatz) standardisiert. Im Vergleich zu Guimaraes et al. wurde in dieser Studie nur *AH Plus* verwendet um auch hier, die Technik der Applikation in den Vordergrund zu stellen [45]. Die Kombination aus Sealer und Guttapercha in der Einstifttechnik erfüllt zudem auch die klinischen Anforderungen an Wurzelkanalfüllmaterialien. Es sind noch viele weitere Applikationstechniken in der Literatur untersucht, um Sealer in den Wurzelkanal einzubringen. Einteilen kann man sie generell in manuelle und maschinelle oder aktivierte Methoden. Zwei Methoden, die weit verbreitet sind, sind die Sealerapplikation mit einem Lentulo und sowie die Applikation mittels Handfeile. Hall et al. verglichen die Sealerapplikation mit einem Lentulo, K-Handfeile und einem Guttaperchastift. Das Ergebnis zeigte signifikant mehr gefüllte Areale für den Lentulo vor der Obturation. Nach der Obturation mit Hilfe der lateralen Kompaktion wiesen die drei Techniken keine Unterschiede an Sealeranteilen auf [50]. Wird Ultraschallenergie auf eine Flüssigkeit übertragen entsteht ein so genanntes „acoustic microstreaming“, eine Verwirbelung entlang der Achse des schwingenden Instrumentes [149]. Studien belegen die Ultraschalleffektivität auch bei einer Reduktion der Schwingungsamplitude von bis zu 40% durch Wandkontakt [61]. Hoen et al. konnten in ihrer Untersuchung bereits in den 80er Jahren des letzten Jahrhunderts zeigen, dass die Übertragung der Ultraschallenergie und die damit verbundene Temperaturerhöhung die Viskosität eines Sealers herabsetzt und so das Fließverhalten optimiert [55]. Eine Aktivierung des Sealers über die Instrumentenspitze hinaus konnte nicht nachgewiesen werden. So schlussfolgerten die Autoren, dass es kein erhöhtes Risiko einer apikalen Überpressung durch diese Methode gibt, zudem kamen sie zu ähnlichen Ergebnissen bezüglich der Sealerapplikation, da auch die Ultraschallaktivierung die signifikant effektivere Methode darstellte. Andere Untersuchungen analysierten die chemischen und physikalischen Eigenschaften von *AH Plus* und *Pulp Canal Sealer* während warmen Wurzelkanalfüllmethoden [19, 148]. Sie konnten nachweisen, dass *AH Plus* seine physikalischen Eigenschaften dahingehend negativ verändert indem zum einen die initiale

Abbindezeit durch Erwärmung verkürzt wird und somit die Fließrate herabgesetzt wird und zum anderen die Endhärte ebenfalls herabgesetzt wird [19]. Der *Pulp Canal Sealer* zeigte keine Veränderten Parameter auf die Hitzeeinwirkung [19].

Wurzelkanalfülltechnik

Die Mehrzahl der Studien, die Sealerplacement-Techniken untersuchten, verwendete die laterale Kompaktion als Wurzelkanalfülltechnik [45, 46]. Die Untersuchung von Ordinda-Zapata et al. zeigte eindeutig, dass ein Zusammenhang zwischen der Obturationstechnik und der Eindringtiefe des Sealers besteht [92]. Zudem ist die Technik der lateralen Kompaktion sehr techniksensitiv und von der Erfahrung des Behandlers abhängig, was zu erheblichen Schwankungen der Ergebnisse führen kann. Aus diesen Gründen wurde in dieser *In-vitro*-Untersuchung die Einstifttechnik gewählt, um Schwankungen der Ergebnisse auf Grund von Fehlern durch die Obturationstechnik ausschließen zu können. Die Studie von Jarrett et al. bestätigten, dass durch den Einsatz von Spreadern während der lateralen Kompaktion Lufteinschlüsse, so genannte „spreader tracts“ verbleiben [60]. Solche Fehler innerhalb der Wurzelkanalfüllung würden Schwankungen im Ergebnis nach sich ziehen. Welche Obturationsmethode überlegen ist, wird nach wie vor kontrovers diskutiert. So kamen Schäfer et al. zu dem Ergebnis, dass es bei der Verwendung der Einstifttechnik zu einem signifikant höheren Sealeranteil kommt [116]. Im Gegensatz dazu konnten andere Studien, welche die laterale Kompaktion mit der Einstifttechnik verglichen, keinen Unterschied hinsichtlich des resultierenden Guttaperchaanteils vermerken [110]. Rodriguez et al. verglichen in ihrer *Ex-vivo*-Arbeit an humanen Zähnen ebenfalls die Single-cone-Technik mit der lateralen Kompaktion und kamen zu dem Ergebnis, dass die Single-cone-Methode im Abstand von 3 mm zum Apex sogar einen signifikant höheren Guttaperchaanteil aufweist [105]. So ist festzuhalten, dass die Single-cone-Technik in geraden Kanälen mit rundem Querschnitt unter Verwendung eines Mastercones mit korrekter, formkongruenter Passform eine qualitative Wurzelfülltechnik darstellt. Um laterale Kanäle oder feinste Strukturen wie Dentintubuli mit Sealer zu füllen, muss durch eine adäquate Obturationsmethode lateral gerichteter Druck generiert werden. Bei den kalten Fülltechniken kann

über das solide, kalte Kernmaterial diese seitliche Kraft nur unzureichend erzeugt werden, so dass warme Füllmethoden hier besser geeignet sind, um Isthmen und Seitenkanäle zu füllen. Eine aktuelle Mikro-CT-Studie von Oh et al. zeigte, dass es keine statistischen Unterschiede an gefülltem Volumenprozent im Hauptkanal zwischen den kalten und warmen Obturationsmethoden auftreten. Die weitere Analyse der CT-Aufnahmen ergab jedoch signifikant mehr gefüllte Isthmen und Irregularitäten für die Continuous-wave-Technik [91]. Eine weitere Methode laterale Kanäle und Ausbuchtungen zu füllen ist die trägerbasierte Warmfüllmethode. Soo et al. bestätigen in ihrer Arbeit, dass die Obturation mit *Thermafil* signifikant mehr Bereiche, von Zähnen mit einer C-förmigen Kanalkonfiguration, füllt als die laterale Kompaktion [135]. Eine weitere In-vitro-Studie mit simulierten Seitenkanälen konnte auch die besten Ergebnisse für die *Thermafil*-Technik und die warmer vertikaler Kompaktion bestätigen [40].

Röntgenauswertung

Die Beurteilung von Wurzelkanalfüllungen an Hand von Röntgenbildern ist eine adäquate Methode. Die Aussagekraft von Aufnahmen in oro-vestibulärer Richtung, sind in der Literatur häufig unter Kritik, da wichtige Informationen der 3. Dimension nicht dargestellt werden können. Es können im klinischen Alltag ausschließlich Beurteilungen über die Länge, Taper und Homogenität getroffen werden. Die Wandständigkeit des Wurzelkanalfüllmaterials, die Dichtigkeit sowie gefüllte laterale Kanäle, sofern sie nicht im rechten Winkel zum Strahlengang liegen, können nur unzureichend oder gar nicht dargestellt werden. Zudem zeigte die Studie von Slaus et al., dass Porositäten häufiger in Aufnahmen mit mesio-distalem Strahlengang beurteilt werden konnten [132]. Ein weiterer Kritikpunkt ist das begrenzte Auflösungsvermögen digitaler Speicherfolien. Zudem führt eine Vergrößerung der digitalen Bilder auf dem Monitor zu einem enormen Qualitätsverlust auf Grund der groben Pixelstruktur. Die Untersuchung von Friedlander et al. zeigte, dass feine endodontische Feilen und apikale Parodontiden deutlich besser und reproduzierbarer auf analogen Röntgenaufnahmen erkannt wurden als auf digitalen Bildern [38]. Aus dieser Kenntnis heraus wäre es auch möglich, analoge Röntgenaufnahmen nachträglich zu digitalisieren. Diese Dateien können dann mit

Nachbearbeitungsprogrammen wie *Photozoom Pro* (Franzis Verlag GmbH, Haar, Deutschland) neu berechnet und vergrößert werden, ohne dabei einen Qualitätsverlust durch ein Rauschen zu generieren. Dieser technische Aufwand bedeutet im Rahmen einer Studie jedoch auch einen enormen zeitlichen Aufwand. Auch kritisch zu sehen ist, dass für *In-vitro*-Studien die Proben sehr aufwändig gestalten werden müssen, um eine standardisierte Auswertung zu ermöglichen. Oft ist aufgrund abtragender Verfahren nur eine einzige Möglichkeit der Auswertung eines sensiblen Bereiches möglich. Ein neuer, nicht destruktiver und reproduzierbarer Ansatz, die Qualität einer Wurzelkanalfüllung sehr präzise beurteilen zu können ist das Micro-CT-Verfahren [133]. Zudem können mit Hilfe von Volumen-CT-Studien auch Volumina der unterschiedlichen Materialien untereinander sehr exakt ausgewertet werden [22]. Nachteil der Mikro-CT-Technik ist der hohe zeitliche und finanzielle Aufwand im Vergleich zu konventionellen Analysemethoden. Des Weiteren werden sehr große Datenmengen durch die Schichtscans produziert. Die Auswertbarkeit stellt den Anwender zum jetzigen Zeitpunkt noch vor Schwierigkeiten, da es ähnlich wie bei DVT-Auswertungen in Anwesenheit von röntgendichten Materialien wie Metallen oder Wurzelfüllmaterialien die Bariumsulfate enthalten zu einer ausgeprägten Streustrahlung kommt, die eine klinische Auswertung oder *In-vitro*-Analyse unmöglich macht.

Die Parameter, die im Rahmen dieser Arbeit untersucht wurden sind, Penetrationstiefe des Sealers in die lateralen Rillen und Mulden, die Homogenität und die Vollständigkeit der gefüllten Hohlräume. Die Analyse der Proben erfolgte in dieser Studie auf Basis digitaler Röntgenaufnahmen, da die Anordnung der Mulden und Rillen im rechten Winkel zur Strahlenachse gelegt wurden und somit deutlich und ohne Verzeichnungen ausgewertet werden konnten. Die Auswertung der Röntgenaufnahmen erfolgte anhand des Score-Systems nach Hommez et al. [57]. Hierbei wird die Auswertung in zwei Grade gegliedert. Grad 1 entspricht einer homogenen Wurzelkanalfüllung ohne sichtbare Blasen und Grad 2 bezeichnet eine inhomogene Füllung mit sichtbaren Blasen. Der klare Vorteil dieser Vorgehensweise liegt in einer unkomplizierten Ja-Nein-Entscheidung, die wenige Schwankungen in den Ergebnissen zulässt. Ein Nachteil besteht darin, dass ein dreidimensionaler Hohlraum mit Hilfe einer zweidimensionalen Aufnahme beurteilt wird ohne eine mögliche Abweichung, die

sich in der anderen Ebene befindet, miteinbeziehen zu können. Eine häufig verwendete Alternative die Homogenität und Füllgrade zu bestimmen ist die Dichtigkeitsmessung mit einem Farbstoff [79]. Methylenblau ist dafür besonders geeignet, da dieser Farbstoff eine sehr kleine Molekülgröße besitzt und dadurch eine gute Penetrationsfähigkeit besitzt [2]. Ein Problem besteht darin, dass eventuelle Lufteinschlüsse eine Penetration verhindern, sodass dieses Verfahren ausschließlich mit zusätzlichem Einsatz von Vakuum oder einer Zentrifuge durchgeführt werden sollte [107].

8.4 Diskussion der Ergebnisse

Die Auswertung aller gemessenen Parameter zeigte deutlich, dass die Ultraschallaktivierung in allen Bereichen die signifikant besten Ergebnisse erreichte. Die manuellen Gruppen (Papierspitze, Guttaperchastift) waren den aktivierten Gruppen (Schall, Ultraschall) deutlich unterlegen. Die Methode des Einbringens von Sealer mittels Papierspitze war effektiver als die mit Hilfe eines Guttapercha Stiftes. Die geringsten Werte wurden 2 mm vor Apex und die durchschnittlich besten Ergebnisse in den koronalen Rillen und Mulden generell gemessen. Dies könnte darin begründet liegen, dass einerseits bereits eine größere Menge des Sealers während des Applizierens am Kanaleingang und in den koronalen Wurzelabschnitten abgestreift wird und andererseits ist bekannt, dass die Aktivierungsmethoden mit Schall oder Ultraschall durch Kontakt mit der Kanalwand vor allem im apikalen Bereich stark an Schwingungsamplituden und damit ein Verlust an Schwingungsenergie. Zu ähnlichen Ergebnissen kamen auch Guimaraes et al [45]. Ihre Studie bestätigte auch die besten Ergebnisse hinsichtlich der Eindringtiefe des Sealers mit der Ultraschallaktivierung. Eine aktuelle Studie von Nikhil et al. bestätigte ebenfalls die Werte dieser Arbeit [89]. Sie analysierten die Eindringtiefe zweier Sealer. Die Placmement-Techniken waren Ultraschall, Lentulo und eine Handfeile mit der „Balanced-force-Bewegung“. Auch hier zeigte die Ultraschallgruppe die besten Resultate.

8.5 Klinischer Ausblick

Anhand der Ergebnisse dieser *In-vitro*-Studie und der Bewertung der zur Verfügung stehenden Literatur kann festgehalten werden, dass die Aktivierung des Sealers mit Ultraschall signifikant bessere Ergebnisse für alle im Rahmen dieser Untersuchung gemessenen Parameter erzielt. Den ausgewerteten Daten ist auch zu entnehmen, dass das manuelle Einbringen des Sealers mit Hilfe eines Guttaperchastiftes oder einer Papierspitze sehr ineffektiv für die Füllung simulierter Mulden und Rillen ist. Da alle Methoden jedoch sehr schlechte Werte für die Vollständigkeit und Homogenität der gefüllten Mulden und Rillen erzielten, bedarf es weiterer Untersuchungen mit unterschiedlichen Techniken, auch diese Parameter adäquat beurteilen und auswerten zu können. Zudem müssen weitere Studien das Risiko einer möglichen apikalen Überpressung untersuchen, wenn Sealer mit aktivierten Applikationsmethoden eingebracht werden. Auch liegt in der Literatur noch keine Studie vor, die sich mit der Auswirkung auf das Obturationsergebnis durch eine Kombination einer aktivierten Sealerplacement-Technik mit einer warmen Wurzelkanalfülltechnik beschäftigt.

9 Literaturverzeichnis

1. Abou-Rass M, Oglesby SW. The effects of temperature, concentration, and tissue type on the solvent ability of sodium hypochlorite. *J Endod* 1981;7:376–377.
2. Ahlberg KM, Assavarop P, Tay WM. A comparison of the apical dye penetration patterns shown by methylene blue and India ink in root filled teeth. *Int Endod J* 1995;28:30-34.
3. Allison DA, Weber CR, Walton RE. The influence of the method of canal preparation on the quality of apical and coronal obturation. *J Endod* 1979; 5:298-304.
4. Altmann ASP, Leitune VCB, Collares FM. Influence of eugenol-based sealers on push-out bond strength of fiber post luted with resin cement: systematic review and metaanalysis. *J Endod* 2015;41:1418-1423.
5. Arslan H, Abbas A, Karatas E. Influence of ultrasonic and sonic activation of epoxy-amine resin-based sealer on penetration of sealer into lateral canals. *Clin Oral Investig* 2016;8:2161-2164.
6. Balguerie E, Van der Sluis L, Vallaey K, Gurgel-Georgelin M, Diemer F. Sealer penetration and adaptation in dentinal tubules. A scanning electron microscopic study. *J Endod* 2011;37:1576-1579.
7. Baumann MA, Die Wurzelkanalfüllung. In: *Endodontie*. S. 124-141. Heidemann, D. (Herausgeber), 4. Auflage, Urban & Fischer Verlag, München, Jena (2001)
8. Baumgartner JC, Cuenin PR. Efficacy of different concentrations of sodium hypochlorite for root canal irrigation. *J Endod* 1992;18:605-612.
9. Berber VB, Gomes BP, Sena NT, Vianna ME, Ferraz CC, Zaia AA, Souza-Filho FJ. Efficacy of various concentrations of NaOCl and instrumentation techniques in reducing *Enterococcus faecalis* within root canals and dentinal tubules. *Int Endod* 2006;39:10–17.
10. Bernardes AR, De Amorin Campelo A, Junior DS, Pereira LO, Duarte MA, Moraes IG, Bramante CM. Evaluation of the flow rate of 3 endodontic sealers: sealer 26, AH Plus and MTA obtura. *Oral Surg Oral Med Oral Pathol Oral Radiol Endod* 2010;109:47–49.

11. Blank-Goncalves LM, Nabeshima CK, Martins GH, De Lima Machado ME. Qualitative analysis of the removal of the smear layer in the apical third of curved roots: conventional versus activation systems. *J Endod* 2011; 37:1268–1271.
12. Bolles JA, He J, Svoboda KKH, Schneiderkam E, Glieckman GN. Comparison of vibringe, EndoActivator, and needle root canal irrigation. *J Endod* 2013;39:708-711.
13. Brandt P, Sonntag D. Aktivierung von Spüllösungen, Eine Literaturübersicht. *Endodontie* 2016;25:7-19.
14. Brzovic V, Miletic I, Zeljezic D, Mladinic M, Kasuba V, Ramic S, Anic I. In vitro genotoxicity of root canal sealers. *Int Endod J* 2009;42:253-263.
15. Buchanan LS. Continuous wave of condensation technique. *Endod Prac* 1998;4:7-10.
16. Burry JC, Stover S, Eichmiller F, Bhagavatula P. Outcomes of primary endodontic therapy provided by endodontic specialists compared with other providers. *J Endod* 2016;42:702-705.
17. Byström A, Sundqvist G. The antibacterial action of sodium hypochlorite and EDTA in 60 cases of endodontic therapy. *Int Endod J* 1985;18:35-40.
18. Cailleteau JG, Mullaney TP: Prevalence of teaching apical patency a various instrumentation and obturation techniques in United States dental schools. *J Endod* 1997;23:394-396.
19. Camilleri J. Sealers and warm guttapercha obturation techniques. *J Endod* 2015;41:72-78.
20. Candeiro GT, Correia FC, Duarte MAH, Ribeiro-Siqueira DC, Gavini G. Evaluation of radiopacity, pH release of calcium ions, and flow of bioceramic root canal sealer. *J Endod* 2012;38:842-845.
21. Cartelo-Baz P, Martin-Biedma B, Cantatore G, Riz-Pinon M, Bahillo J, Rivas-Mundina B, Varela-Patino P. In vitro comparison of passive and continuous ultrasonic irrigation in simulated lateral canals of extracted teeth. *J Endod* 2012;38:688-691.
22. Cobankara FK, Adanir N, Belli S. Evaluation of the influence of smear layer on the apical and coronal sealing ability of two sealers. *J Endod* 2004;30:406-409.

23. Chandrasekhar V, Morishetty PK, Metla SL, Raju RV. Expansion of guttapercha in contact with various concentrations of zinc oxide-eugenol sealer: a three-dimensional volumetric study. *J Endod* 2011;3:697-700.
24. Chu CH, Lo EC, Cheung GS. Outcome of root canal treatment using Thermafill and cold lateral condensation filling techniques. *Int Endod J* 2005;38:179-185.
25. Cutright DE, Bhaskar SN. Pulpal vasculature as demonstrated by a new method. *Oral Surg Oral Med Oral Pathol* 1969;27:678-683.
26. De Deus QD, Horionte. Frequency, location and direction of lateral, secondary, and accessory canals. *J Endod* 1975;1:376-380.
27. De Gregori C, Estevez R, Cisneros R, Paranipe A, Cohenca N. Efficacy of different irrigation and activation systems on the penetration of sodium hypochlorite into simulated lateral canals and up to working length: an in vitro study. *J Endod* 2010;36:1216-1221.
28. De Munck J, Vargas M, Van Landuyt K, Hikita K, Lambrechts P, Van Meerbeek B. Bonding of an auto-adhesive luting material to enamel and dentin, *Dent Mater* 2004;20:963–971.
29. Demirci GK, Caliskan MK. A prospective randomized comparative study of cold lateral condensation versus core/guttapercha in teeth with periapical lesions. *J Endod* 2016;42:206-210.
30. DGZ und DGZMK Wurzelkanalfüllpasten und -füllstifte, Gemeinsame Stellungnahme der DGZMK und DGZ. *Dtsch Zahnärztl Z* 2000;55:9-11.
31. DGZ, DGZMK Wissenschaftliche Stellungnahme: Die Wurzelkanalspülung. *Dtsch Zahnärztl Z* 2006;10
32. Drake DR, Wiemann AH, Rivera EM, Walton RE. Bacterial retention in canal walls in vitro: effect of smear layer. *J Endod* 1994;20:78–82.
33. Dwan JJ, Glickman GN. 2-D photoelastic stress analysis of NiTi and stainless steel finger spreaders during lateral compaction. *J Endod* 1995;21:221.
34. Eldeniz AU, Mustafa K, Ørstavik D, Dahl JE. Cytotoxicity of new resin-, calcium hydroxide- and silicone-based root canal sealers on fibroblasts derived from human gingiva and L929 cell lines. *Int Endod J*. 2007;40:329-337.

35. European Society of Endodontology (ESE) Quality guidelines for endodontic treatment: consensus report of the European Society of Endodontology. *Int Endod J* 2006;39:921-930.
36. Ferrari M, Mannocci F, Vichi A, Cagidiaco MC, Mjör IA. Bonding to root canal: structural characteristics of the substrate. *Am J Dent* 2000;13:255–260.
37. Fransen JN, He J, Glickman GN, Rios A, Shuman JD, Honeyman A. Comparative assessment of Active GP/glass ionomer sealer, Resilon/Epiphany, and guttapercha/AH-Plus obturation: a bacterial leakage study. *J Endod* 2008;34:725-727.
38. Friedlander LT, Love RM, Chandler NP. A comparison of phosphor plate digital images with conventional radiographs for the perceived clarity of fine endodontic files and periapical lesions. *Oral Surg Oral Med Oral Pathol Oral Radiol Endod* 2002;93:321-327.
39. Gettleman BH, Messer H, El Deeb ME. Adhesion of sealer cements to dentin with and without the smear laser. *J Endod* 1991;17:15-20.
40. Goldberg F, Artaza LP, de Silvio A. Effectiveness of different obturation techniques in the filling of simulated lateral canals. *J Endod* 2001;27:362-364.
41. Goldberg F, Artaza LP, Silvio A. Influence of calcium hydroxide dressing on the obturation of simulated lateral canals. *J Endod* 2002;28:99-101.
42. Goodman A, Schilder H, Aldrich W. The thermomechanical properties of guttapercha. Part IV. A thermal profile of warm guttapercha packing procedure. *Oral Surg Oral Med Oral Pathol* 1981;5:544-551.
43. Gordon MP, Love RM, Chandler NP. An evaluation of .06 tapered guttapercha cones for filling of .06 taper prepared curved root canals. *Int Endod J* 2005;38:87-96.
44. Guess GM, Edwards KR, Yang ML, Iqbal MK, Kim S. Analysis of continuous-wave obturation using a single cone and hybrid technique. *J Endod* 1993;29:59-512.
45. Guimaraes BM, Amoroso-Silva PA, Alcalde MP, Marciano MA, De Andrade FB, Duarte MAH. Influence of ultrasonic activation of 4 root canal sealers on the filling quality. *J Endod* 2014;40:964-968.

46. Guinesi AS, Faria G, Tanomaru-Filho M, Bonetti-Filho I. Influence of sealer placement technique on the quality of root canal filling by lateral compaction or single cone. *Braz Dent J* 2014;25:117-122.
47. Gurgel-Filho ED, Andrade Feitosa JP, Teixeira FB, Monteiro de Paula RC, Araujo Silva JB, Souza-Filho FJ. Chemical and X-ray analyses of five brands of dental guttapercha cone. *Int Endod J* 2003;36:302-307.
48. Haapasalo M, Quain W, Sheen Y. Irrigation: Beyond the smear layer. *Endodontic Topics* 2012;27:35–53.
49. Haapasalo M, Shen Y, Qian W, Gao Y. Irrigation in endodontics. *Dent Clin North Am* 2010;54:291-312.
50. Hall MC, Clement DJ, Dove B, Walker WA. A comparison of sealer placement techniques in curved canals. *J Endod* 1996;22:638-642.
51. Handtma S, Lindemann W, Hüttemann H, Schulte W: Korrosionserscheinungen an Silberstiften im Wurzelkanal (I). *Dtsch Zahnärztl Z* 1987; 42: 362- 367.
52. Haznedaroglu F. Efficacy of various concentrations of citric acid at different pH values for smear layer removal. *Oral Surg Oral Med Oral Pathol Oral Radio Endod* 2003;96:340:344.
53. Hellwig E, Klimek J, Attin T, Einführung in die Zahnerhaltung, 4. Auflage, Elsevier Urban und Fischer, München, 2007, 303-344.
54. Hess D, Solomon E, Spears R, He J. Retreatability of a bioceramic root canal sealing material. *J Endod* 2011;37:1547-1549.
55. Hoen MM, La Bounty GL, Keller DL. Ultrasonic endodontic sealer placement. *J Endod* 1988;14:169-174.
56. Holcomb JQ, Pitts DL, Nicholls JI. Further investigation of spreader loads required to cause vertical root fracture during lateral condensation. *J Endod* 1987;13:277-284.
57. Homme GM, Coppens CR, D Moor RJ Periapical health related to quality of coronal restorations and root fillings. *Int Endod J* 2002;35:680-689.
58. Homme GMG, De Moor RJG, Braem M. Endodontic treatment performed by flemish dentists. Part 2. Canal filing and decision making for referrals and treatment of apical periodontitis. *Int Endod J* 2003;36:344-351.

59. Hülsmann M. Effects of mechanical instrumentation and chemical irrigation on the root canal dentin and surrounding tissues. *Endodontic Topics* 2013;29:55-86.
60. Jarrett IS, Marx D, Covey D, Karmazin M, Lavin M, Gound T. Percentage of canals filled in apical cross sections - an in vitro study of seven obturation techniques. *Int Endod J* 2004;37:392-398.
61. Jiang LM, Verhaagen B, Versluis M, Langedijk J, Wesselink P, Van der Sluis LWM. The influence of the ultrasonic intensity on cleaning efficacy of passive ultrasonic irrigation. *J Endod* 2011;3:688-692.
62. Kamburis JJ, Barker TH, Barfield RD, Eleazer PD. Removal of organic debris from bovine dentin shavings. *J Endod* 2003;29:559–561.
63. Kazemi RB, Safavi KE, Sponberg LS. Dimensional changes of endodontic sealers. *Oral Surg Oral Med Oral Pathol* 1993;76:766-771.
64. Kim YK. Critical Review on Methacrylate Resin–based Root Canal Sealers. *J Endod* 2010;36:383–399.
65. Kokkas AB, Boutsoukis A, Vassiliadis LP, Stavrianos CK. The influence of the smear layer on dentinal tubule penetration depth by three different root canal sealers: an in vitro study, *J Endod* 2004;30:100–102.
66. Kontakiotis EG, Tzanetakakis GN, Loizides AL. A 12-month longitudinal in vitro leakage study on a new silicon-based root canal filling material (Gutta-Flow). *Oral Surg Oral Med Oral Pathol Oral Radiol Endod* 2007;103:854-859.
67. Kossev D, Stevanov V. Ceramics-based sealers as new alternative to currently used endodontic sealers. *Roos* 2009;1:42-48.
68. Langeland K, Olsson B, Pascon EA. Biological evaluation of Hydron, *J Endod* 1981;7:196–204.
69. Lea CS, Apicella MJ, Mines P, Yancich PP, Parker MH. Comparison of the obturation density of cold lateral compaction versus warm vertical compaction using the continuous wave of condensation technique. *J Endod* 2005;1:37-39.
70. Leonardo MR, L.A.B. de Silva, M.T. Filho, R.S. de Silva Release of formaldehyde by 4 endodontic sealers *Oral Surg Oral Med Oral Pathol Oral Radiol Endod* 1999;88:221–225.

71. Lertchirakarn V, Palamara JE, Messer HH. Patterns of vertical root fracture: factors affecting stress distribution in the root canal. *J Endod* 2003;29:523-528.
72. Leyhausen G, Heil J, Reifferscheid G, Waldmann P, Geurtsen W. Genotoxicity and cytotoxicity of the epoxy resin based root canal sealer AH Plus *J Endod* 1999;25:109-113.
73. Lipski M. Root surface temperature rises during root canal obturation, in vitro, by the continuous wave of condensation technique using System B heatsource. *Oral Surg Oral Med Oral Pathol Oral Radiol Endod* 2005;4:505-510.
74. Liu Q, Hedberg EL, Liu Z, Bahulekar R, Meszlenyi RK, Mikos AG. Preparation of macroporous poly (2-hydroxyethyl methacrylate) hydrogels by enhanced phase separation. *Biomaterials* 2000;21:2163-2169.
75. Mai S, Kim YK, Hiraishi N, Ling J, Pashley DH, Tay FR. Evaluation of the true self-etching potential of a fourth generation self-adhesive methacrylate resin-based sealer, *J Endod* 2009;35:870-874.
76. Marciano MA, Ordinola-Zapata R, Cunha TV, Duarte MA, Cavenago BC, Garcia RB, Bramante CM, Bernardineli N, Moraes IG. Analysis of four guttapercha techniques used to fill mesial root canals of mandibular molars. *Int. Endod J* 2011;44:321-329.
77. Marquis VL, Dao T, Farzaneh M, Abitbol S, Friedman S. Treatment outcome in endodontics: the Toronto Study. Phase III: initial treatment. *J Endod* 2006;32:293-306.
78. Martinho FC, Gomes BP. Quantification of endotoxins and cultivable bacteria in root canal infection before and after chemomechanical preparation with 2,5% sodium hypochlorite. *J Endod* 2008;34:268-272.
79. Matloff IR, Jensen RJ, Singer I, Tabibi A. A comparison of methods used in root canal sealability studies. *Oral Surg Oral Med Oral Pathol* 1982;53:203-208.
80. Mc Michael GE, Primus CM, Oppermann LA. Dentinal tubule penetration of tricalcium silicate sealer. *J Endod* 2016;42:632-636.
81. McComb D, Smith DC. Comparison of physical properties of polycarboxylate-based and conventional root canal sealers. *J Endod* 1976;2:228-235.

82. Mohammadi Z, Yazdizadeh M. Evaluation of the antibacterial activity of new root canal sealers. *J Clin Dent*. 2007;18:70-72.
83. Mukthar-Foygad D. Cytocompatibility of new bioceramic-based materials on human fibroblast cells (MRC-5). *Oral Surg Oral Med Oral Pathol Oral Radiol Endod* 2011;112:e137-e142.
84. Murrin JR, Reader A, Foreman DW, Beck M, Meyers WJ. Hydron versus gutta-percha and sealer: a study of endodontic leakage using the scanning electron microscope and energy-dispersive analysis, *J Endod* 1985;11:101-109.
85. Nagas E, Uyanik MO, Eymirli A, Cehreli ZC, Vallittu PK, Lassila LV, Durmaz V. Dentin moisture conditions affect the adhesion of root canal sealers. *J Endod* 2012;2:240-244.
86. Nair PN. On the causes of persistent apical periodontitis: a review. *Int Endod J* 2006;39:249-281.
87. Nassar M, Awawdeh L, Jamleh A, Sadr A, Tagami J. Adhesion of Epiphany self-etch sealer to dentin treated with intracanal irrigating solutions. *J Endod* 2011;37:228-230.
88. Neanni N, Thoma K, Zehnder M. Soft tissue dissolution capacity of curred used and potential endodontic irrigants. *J Endod* 2004;30:785-787.
89. Nikhil V, Bansal P, Sawani S. Effect of technique of sealer agitation on percentage and depth of MTA Fillapex sealer penetration: A comparative in vitro study. *J Conserv Dent* 2015;18:119-123.
90. Ogasawara T, Yoshimine Y, Yamamoto M, Akamine A. Biocompatibility of an experimental glass-ionomer cement sealer in rat mandibular bone. *Oral Surg Oral Med Oral Pathol Oral Radiol Endod* 2003;96:458-465.
91. Oh S, Perinpanayagam, Kum DJW, Lino SM, Yoo YJ, Chang SW, Lee W, Baek SH, Zhn Q, Kum KY. Evaluation of three obturation techniques in the apical third of mandibular first molar mesial root canals using micro-computed tomography. *Journal of dental science* 2016;11:95-102.
92. Ordinda-Zapata R, Bramante CM, Graeff MSZ, Del Carpio PA, Vivan RR, Camarg EJ, Garcia RB, Bernardineli N, Gutmann JL, De Moraes IG. Depth and percentage of penetration of endodontic sealers into dentinal tubules after root canal obturation using lateral compaction technique: A confocal

- laser scanning microscopy study. *Oral Surg Oral Med Oral Pathol Endod* 2009;108:450-457.
93. Ørstavik D. Endodontic filling materials. *Endodontic Topics* 2014; 31:53-67.
94. Ørstavik D. Materials used for root canal obturation: technical, biological and clinical testing. *Endod Topics* 2005;12:25-38.
95. Paqué F, Sirtes G. Apical sealing ability of Resilon/Epiphany versus gutta-percha/AH Plus: immediate and 16-months leakage. *Int Endod J* 2007; 40:722-729.
96. Pascon EA, Spångberg SW. In vitro cytotoxicity of root canal filling materials: 1. Guttapercha. *J Endod* 1990;16:429-433.
97. Pécora JD, Ribeiro RG, Guerisoli DMZ, Barbizan JVB, Marchesan MA. Influence of the spatulation of two zinc oxide-eugenol-based sealers on the obturation of lateral canals. *Pesqui Odontol Bras* 2002 ;16 :127-130.
98. Peters LB, Wesselink PR, Moorer WR. The fate and the role of bacteria left in root dentinal tubules. *Int Endod J* 1995;28:95-99.
99. Petschelt A, Stumpf B, Raab W. Adhesion of root canal sealers with and without smear layer. *Dtsch Zahnärztl Z* 1987;42:743-746.
100. Portenier I, Haapasalo H, Ørstavik D, Yamauchi M, Haapasalo M. Inactivation of the antibacterial activity of iodine potassium iodide and chlorhexidine digluconate against *Enterococcus faecalis* by dentin, dentin matrix, type-I collagen, and heat-killed microbial whole cells. *J Endod* 2002;28:634–637.
101. Radovic I, Monticelli F, Goracci C, Vulicevic ZR, Ferrari M. Self-adhesive resin cements: a literature review, *J Adhes Dent* 2008;10:251–258.
102. Rhome BH, Solomon EA, Rabinowitz JL. Isotopic evaluation of the sealing properties of lateral condensation, vertical condensation, and Hydron. *J Endod* 1981;7:458–461.
103. Ricucci D, Loghin S, Siqueira JF Jr. Exuberant biofilm infection in lateral canals as the cause of short-term endodontic treatment failure: report of a case. *J Endod* 2013;39:712-718.
104. Ricucci D, Siquiera JF Jr. Fate of the tissue in lateral canals and apical ramifications in response to pathologic conditions and treatment procedures. *J Endod* 2010;36:1-15.

105. Rodrigues A, Bonetti-Filho I, Faria G, Andolfatto C, Camargo Illella Berbet FL, Kuga MC. Percentage of guttapercha in mesial canals of mandibular molars obturated by lateral compaction or single cone techniques. *Microsc Res Tech* 20012;75:1229-1232.
106. Roggendorf MJ, Ebert J, Herbstleb E, Kentsch C, Petschelt A, Frankenberger R, DZZ 60. Jahrgang Supplement 2005 Sonderh., S. A 161, Jahrestag. der DGZMK 2007;103:854-859.
107. Roggendorf MJ, Ebert J, Petschelt A, Frankenberger R. Influence of moisture on the apical seal of root canal fillings with five different types of sealer. *J Endod* 2007;33:31-33.
108. Roggendorf MJ, Ebert J, Petschelt A, International Endodontic Journal, P. 17, The 10th Biennial Congress ESE 4-6 October 2001 Munich, Germany
109. Roggendorf MJ, Ebert J, Schulz C, Petschelt A. The 32nd Annual Meeting of the AADR March 12-15, 2003 San Antonio, USA.
110. Romania C, Beltes P, Boutsoukis C, Dandakis C. Ex-vivo area-metric analysis of root canal obturation using guttapercha cones of different taper. *Int Endod J* 2009;42:491-498.
111. Ruddle CJ. Chapter 8: Cleaning and shaping the root canal system. *Pathways of the pulp*, 7th edn. St. Louis: Cohen and Burns, 2002:231-291.
112. Ruff ML, McClanahan SB, Babel BS. In Vitro antifungal efficacy of four irrigants as a final rinse. *J Endod* 2006;32:331-333.
113. Saleh IM, Ruyter IE, Haapasalo MP, Ørstavik D. Adhesion of endodontic sealers: scanning electron microscopy and energy dispersive spectroscopy. *J Endod* 2003;29:595-601.
114. Scelza ZMF, Da Silva Pierro VS, Changas MA, Da Silva LE, Scelza P. Evaluation of inflammatory response of EDTA, EDTA-T, and citric acid in animal model. *J Endod* 2010;36:515-519.
115. Schäfer E, Köster M, Bürklein S. Percentage of guttapercha filled areas in canals instrumented with nickel titanium systems and obturated with matching single cones. *J Endod* 2013;39:924-928.
116. Schäfer E, Nelius B, Bürklein S. a comparative evaluation of guttapercha filled areas in curved root canals obturated with different techniques. *Clin Oral Investig* 2012;16:225-230.

117. Schäfer E, Zandbiglari T. Solubility of root-canal sealers in water and artificial saliva. *Int. Endod J* 2003;36:660-669.
118. Schilder H. Filling root canals in three dimensions. *Dent Clin North Am* 1967;11:723-744.
119. Schwartz RS. Adhesive dentistry and endodontics: part 2-bonding in the root canal system: the promise and the problems - a review. *J Endod* 2006;32:1125-1134.
120. Scientific Compendium AH Plus (2005) Dentsply DeTrey GmbH, Konstanz, Deutschland.
121. Sen BH, Piskin B, Demirci T. Observation of bacteria and fungi in infected root canals and dentinal tubules by SEM. *Endod Dent Traumatol* 1995;11:6-9.
122. Sharavan A, Haghdooost AA, Adl A, Rahimi H, Shadifar F. Effect of smear layer on sealing ability of canal obturation: a systematic review and meta-analysis. *J Endod* 2007;33:96–105.
123. Shokouhinejad N, Sabeti M, Gorejestani H, Saghiri MA, Lotfi A, Hosseini A. Penetration of Epiphany, Epiphany self-etch, and AH Plus into dentinal tubules: a scanning electron microscopy study. *J Endod* 2011;37:1316-1319.
124. Silva EJ, Perez R, Valentim RM, Belladonna FG, De-Deus GA, Lima IC, Neves AA. Dissolution, dislocation and dimensional changes of endodontic sealers after a solubility challenge: A micro-CT approach. *Int Endod J* 2016; Epub ahead of print.
125. Silva LA, Leonardo MR, Assed S, Filho MT. Histological study of the effect of some irrigating solutions on bacterial endotoxin in dogs. *Braz Dent J* 2004;15:109–114.
126. Sim TP, Knowles JC, Ng YL, Shelton J, Gulabivala K. Effect of sodium hypochlorite on mechanical properties of dentine and tooth surface strain. *Int Endod J* 2001;34:120–132.
127. Siqueira JF Jr, Rocas IN, Favieri A, Lima KC. Chemomechanical reduction of the bacterial population in the root canal after instrumentation and irrigation with 1%, 2.5%, and 5.25% sodium hypochlorit. *J Endod* 2000;26:331–334.

128. Siqueira JF Jr, Rocas IN, Lopes HP. Patterns of microbial colonization in primary root canal infections. *Oral Surg Oral Med Oral Pathol Oral Radiol Endod* 2002;93:174–178
129. Siqueira JF Jr, Rocas IN. Clinical implications and microbiology of bacterial persistence after treatment procedures. *J Endod* 2008;34:1291-1301.
130. Siqueira JF, Favieri A, Gahyva SMM, Moraes SRM, Lima KC, Lopes HP. Antimicrobial activity and flow rate of newer and established root canal sealers. *J Endod* 2000;26:274-277.
131. Sirtes G, Waltimo T, Schaetzle M, et al. The effects of temperature on sodium hypochlorite short-term stability, pulp dissolution capacity, and antimicrobial efficacy. *J Endod* 2005;31:669–671.
132. Slaus G, Vandewijngaert S, Bottenberg P. Qualitätskontrolle von Wurzelkanalfüllungen. Eine In-vitro-Studie. *Dtsch Zahnärztl Z* 2001;56:177.
133. Somma F, Cretella G, Carotenuto M, Pecci R, Bedini R, De Biasi M, Angerame D. Quality of thermoplasticized and single point root fillings assessed by micro-computed tomography. *Int Endod J* 2011;44:362-369.
134. Sonntag D, Guntermann A, Kim SK, Stachniss V. Root canal shaping with manual stainless steel files and rotary Ni-Ti files performed by students. *Int Endod J* 2003;36:246-255.
135. Soo WKM, Thory YL, Gutmann JL. A comparison of four gutta-percha filling techniques in simulated c-shaped canals. *Int Endod J* 2015;48:736-746.
136. Sousa CJ, Montes CR, Pascon EA, Loyola AM, Versiani MA. Comparison of the intraosseous biocompatibility of AH Plus, EndoREZ, and Epiphany root canal sealers. *J Endod* 2006;32:656-662.
137. Stevens RW, Strother JM, McClanahan SB. Leakage and sealer penetration in smear-free dentin after a final rinse with 95% ethanol. *J Endod* 2006;32:785-788.
138. Stojicic S, Zivkovic S, Qin W, Zhang H, Haapasalo M. Tissue dissolution by sodium hypochlorite: Effect of Concentration, temperature, agitation and surfactant. *Endod J* 2010;36:1558-1562.
139. Sweatman TL, Baumgartner JC, Sakaguchi RL. Radicular temperatures associated with thermoplasticized guttapercha. *J Endod* 2001;8:512-515.
140. Tay FR, Loushine RJ, Monticelli F, Weller RN, Breschi L, Ferrari M, Pashley DH. Effectiveness of resin-coated gutta-percha cones and a dual-cured,

- hydrophilic methacrylate resin-based sealer in obturating root canals. *J Endod* 2005;31:659–664.
141. Timpawat S, Harnivattisai C, Senawongs P. Adhesion of glassionomer root canal sealer to the root canal wall. *J Endod* 2001;27:168-171.
142. Torabinejad M, Corr R, Handysides R, Shabahang S. Outcomes of nonsurgical retreatment and endodontic surgery: a systematic review. *J Endod* 2009;35:930–937.
143. Torabinejad M, Handysides R, Khademi AA, Bakland LK, Linda L. Clinical implications of the smear layer in endodontics: a review. *Oral Surg Oral Med Oral Pathol Oral Radiol Endod* 2002;94:658-666.
144. Torabinejad M, Parirokh M. Mineral trioxide aggregate: a comprehensive literature review-part II: leakage and biocompatibility investigations. *J Endod* 2010;2:190-202.
145. Tunar AK, Ünal B. Comparison of sealer penetration using the EndoVac irrigation system and conventional needle root canal irrigation. *J Endod* 2014;40:613-617.
146. Vertucci FJ, Williams RG. Furcation canals in the human mandibular first molar. *Oral Surg Oral Med Oral Pathol* 1974;38:308-314.
147. Vertucci FJ. Root canal anatomy of the human permanent teeth. *Oral Surg Oral Med Oral Pathol* 1984;58:589-599.
148. Viapiana R, Guerreiro-Tonomaru JM, Tonomaru-Filho M, Camilleri J. Investigation of the effect of sealer use on the heat generated at the external root surface during root canal obturation using warm vertical compaction technique with system B heat source. *J Endod* 2014;40:555-561.
149. Walmsly AD. Ultrasound and root canal treatment: the need for scientific evaluation. *Int. Endod J* 1987;20:105-111.
150. Wang Z. Bioceramic materials in endodontics. *Endodontic Topics* 2015;32:3-30.
151. Whitworth J. Methods of filling root canals: principles and practices. *Endodontic Topics* 2005;12:2-24.
152. Wilson BL, Baumgartner JC. Comparison of spreader penetration during lateral compaction of .04 and .02 tapered guttapercha. *J Endod* 2003;29:828-831.

153. Wong AW, Tsang CS, Zhang S, Li KY, Zhang C, Chu CH. Treatment outcomes of single-visit versus multiple-visit non surgical endodontic therapy: a randomized clinical trial. *BMC Oral Health* 2015;15:162-173.
154. Yang Q, Troczynski T, Liu DM. Influence of apatite seeds on the synthesis of calcium phosphate cement. *Biomaterials* 2002;23:2751-2760.
155. Yesilsoy C, Radiographic evidence of absorption of Hydron from an obturated root canal, *J Endod* 1984;10:321-323.
156. Zehnder M, Schmidlin P, Sener B, Waltimo T. Chelation in root canal therapy reconsidered. *J Endod* 2005;31:817-820.
157. Zehnder M. Root canal irrigants. *J Endod* 2006;32:389-398.
158. Zhang H, Shen Y, Ruse ND, Haapasalo M. Antimicrobial activity of endodontic sealers by modified direct contact test against enterococcus faecalis. *J Endod* 2009;35:1051-1055.
159. Zhon HM, Shen Y, Zheng W, Li L, Zheng Y, Haapasalo M. Physical properties of 5 root canal sealers. *J Endod* 2013; 39:1281-1286.
160. Zmener O, Dominguez FV. Silver accumulations in periapical granulomas: report of five cases using the scanning electron microscope, the electron microprobe, and other complementary methods. *Oral Surg Oral Med Oral Pathol* 1988;65:94-100.
161. Zmener O, Pameijer CH, Serrano SA, Vidueira M, Macchi RL. Significance of moist root canal dentin with the use of methacrylate-based endodontic sealers: an in vitro coronal dye leakage study. *J Endod* 2008;34:76–79.

10 Anhang

10.1 Geräte und Materialien

Diamantrennscheibe	Coltene/Whaledent GmbH, Langenau, Deutschland
<i>EndoStepper</i>	SET Olching, Dr. Karl Behr
PUR-Harz <i>Biresin G27</i>	Sika B.V., Utrecht, Niederlande
Ethanol 70 %	Apotheke des Klinikums Erlangen
Fissurenbohrer	Horico, Berlin, Deutschland
<i>Flex-Master</i> VDW	VDW GmbH, München, Deutschland
<i>Grandio-Flow</i>	Voco GmbH, Cuxhaven, Deutschland
Guttaperchaspitzen	Roeko Coltène/Whaledent Langenau, Deutschland
Klebewachs	Supradent, Bonn, Deutschland
Lichtmikroskop <i>Pico</i>	Zeiss AG, Oberkochen, Deutschland
<i>Mity Roto-Feile</i>	Losser & Co, Leverkusen, Deutschland
Natriumhypochlorit 5 %	Werkstoffwissenschaftliches Labor der Poliklinik für Zahnerhaltung und Parodontologie, Universitätsklinikum Erlangen
Operationsmikroskop	Zeiss OPMI S6, Zeiss, Oberkochen, Deutsch- land

Papierspitzen	Coltène/Whaledent GmbH + Co. KG, Langenau, Deutschland
Pinzel	Faber-Castell AG, Stein, Deutschland
Polymerisationslampe <i>Polylux II</i>	KaVo GmbH, Biberbach, Deutschland
<i>ROEKO CanalBrush</i>	Coltène/Whaledent GmbH + Co. KG, Langenau, Deutschland
Scaler	Hu-Friedy, Leimen, Deutschland
Silikonstopper	Dentsply Maillefer, Ballaigues, Schweiz
Winkelstück grün	KaVo GmbH, Biberach, Deutschland
Winkelstück rot	KaVo GmbH, Biberach, Deutschland
Zitronensäure 40%	Werkstoffwissenschaftliches Labor der Poliklinik für Zahnerhaltung und Parodontologie, Universitätsklinikum Erlangen

10.2 Abbildungs- und Tabellenverzeichnis

Abbildungen

- Abb. 1: *AH Plus*-Sealer in der Paste-Paste Applikationsform
- Abb. 2: Das *Total Fill* Wurzelkanalset besteht aus Papierspitzen, beschichteten Guttaperchapoints und dem biokeramischen Sealer
- Abb. 3: Flowchart des Versuchaufbaus
- Abb. 4: Postoperative Röntgenbilder nach erfolgter Wurzelkanalfüllung
- Abb. 5: Durchschnittliche Penetrationstiefe von Sealer in die Rillen in Abhängigkeit von der Placement-Technik
- Abb. 6: Durchschnittliche Penetrationstiefe von Sealer in die Mulden in Abhängigkeit von der Placement-Technik
- Abb. 7: Penetrationstiefe von Sealer in Rillen und Mulden im Vergleich
- Abb. 8: Homogenität der Füllung in Rillen
- Abb. 9: Homogenität der Füllung in Mulden
- Abb. 10: Vollständigkeit der Füllung in Rillen in Abhängigkeit von der Placementtechnik
- Abb. 11: Vollständigkeit der Füllung in Mulden in Abhängigkeit von der Placementtechnik

Tabellen

- Tab. 1: Darstellung der Mittelwerte, der Standardabweichung der Sealerpenetrationstiefen von Rillen und Mulden pro Wurzelkanalabschnitt und gesamt sowie den Signifikanzwerten für den Vergleich der 4 Gruppen (Kruskal-Wallis-Test).
- Tab. 2: Paarweiser Vergleich der Sealerpenetrationstiefen zwischen den vier experimentellen Gruppen (Mann-Whitney-Test) in den vier Kanalabschnitten für Mulden und Rillen in den Kanalabschnitten sowie Mulden und Rillen insgesamt.
- Tab. 3: Ergebnisse der statistischen Analyse der Sealerpenetrationstiefe (abhängige Stichproben) in den vier experimentellen Gruppen zwischen den einzelnen Kanalabschnitten mittels Friedman-Test (alle Kanalabschnitte) sowie Wilcoxon-Test (paarweiser Vergleich aller Kanalabschnitte).

11 Verzeichnis akademischer Lehrer

Meine akademischen Lehrer der Friedrich-Alexander-Universität Erlangen-Nürnberg waren die Damen und Herren Professoren und Dozenten:

Becker, Beuscher, Eichhorn, Frank, Frankenberger, Gasteiger, Göhl, Hartmann, Hirschfelder, Hornung, Korbmacher, Morgenstern, Neuhuber, Neukam, Parsch, Pelka, Petschelt, Schlegel, Schmieder, Schneider, Simon, Wichmann, Wittern-Sterzel, Zolk

12 Danksagung

Mein Dank gilt Herrn Prof. Dr. R. Frankenberger für die Möglichkeit, diese Arbeit an der Philipps-Universität-Marburg in der Abteilung für Zahnerhaltungskunde durchführen zu können.

Mein ganz besonderer Dank gilt Herrn OA Priv.-Doz. Dr. M. J. Roggendorf für die Anregung zur Bearbeitung des Themas, für die sehr gute Unterstützung im experimentellen Teil der Arbeit, für die Geduld und für die Korrektur meines Manuskripts.

Sehr dankbar bin ich Herrn OA Priv.-Doz. Dr. J. Ebert, der Zahnklinik 1 - Zahnerhaltung und Parodontologie des Universitätsklinikums Erlangen, für die Hilfe bei der statistischen Auswertung.

Herrn Marco Zapf danke ich für die Gesellschaft während des gemeinsamen Durchdenkens der experimentellen Laborphase und für die tolle, vertraute Zeit während des Studiums, für eine ganz besondere Freundschaft über das Studium hinaus.

Mein ganz persönlicher Dank gilt meiner Familie, besonders meinen geliebten Eltern, Ingeborg Brandt und Horst Brandt, die mir dieses Studium und meinen Lebensweg erst ermöglicht haben, für das Vertrauen, die Geborgenheit und die Liebe die sie mir entgegenbrachten. Meiner Oma, Rosa Baumgartl, möchte ich von Herzen danken, sie war der liebevollste Mensch der Welt, ohne Ihre zusätzliche Hilfe hätte ich mein Studium sicherlich so selbstverständlich nicht durchführen können. Zuletzt möchte ich meiner Lebenspartnerin Dr. Carmen Mark danken, die für mich die wichtigste Stütze im Leben ist, die mich versteht, und mir immer ein vertrautes Gefühl entgegenbringt und mich zum glücklichsten Menschen macht

Ehrenwörtliche Erklärung über die selbstständige Anfertigung der Dissertation

„Ich erkläre ehrenwörtlich, dass ich die dem Fachbereich Medizin Marburg zur Promotionsprüfung eingereichte Arbeit mit dem Titel: *„Obturation artifiziereller Seitenkanäle nach vier verschiedenen Sealerplacementtechniken - Eine In-vitro-Studie“* in dem medizinischen Zentrum für Zahn-, Mund- und Kieferheilkunde Abteilung für Zahnerhaltungskunde des Fachbereichs Medizin der Philipps-Universität Marburg unter Leitung von Direktorin: Prof. Dr. H. Korbmacher-Steiner mit Unterstützung durch Priv.-Doz. Dr. Matthias J. Roggendorf ohne sonstige Hilfe selbst durchgeführt und bei der Abfassung der Arbeit keine anderen als die in der Dissertation aufgeführten Hilfsmittel benutzt habe. Ich habe bisher an keinem in- oder ausländischen Medizinischen Fachbereich ein Gesuch um Zulassung zur Promotion eingereicht, noch die vorliegende oder eine andere Arbeit als Dissertation vorgelegt.

Ich versichere, dass ich sämtliche wörtlichen oder sinngemäßen Übernahmen und Zitate kenntlich gemacht habe.

Mit dem Einsatz von Software zur Erkennung von Plagiaten bin ich einverstanden.

Ort, Datum

Unterschrift

Die Hinweise zur Erkennung von Plagiaten habe ich zur Kenntnis genommen.

Ort, Datum

Unterschrift Betreuer